Entwurf und Bau einer Infrarotkamera für den Wellenlängenbereich 3 bis 120 μm

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

der Fakultät für Physik
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von

Richard Mühlheim
aus Pechgrün

1986

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543904_0036

Entwurf und Bau einer Infrarotkamera für den Wellenlängenbereich 3 bis 120 μm

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

der Fakultät für Physik
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von

Richard Mühlheim
aus Pechgrün

1986

Tag der mündlichen Prüfung: 2.6.1986

Dekan: Prof.Dr.Hans Ruder

1.Berichterstatter: Prof.Dr.Michael Grewing

2.Berichterstatter: Prof.Dr.Rüdiger Staubert

Abstract

MÖHLHEIM, RICHARD:

ENTWURF UND BAU EINER INFRAROT-KAMERA FÜR DEN
WELLENLÄNGENBEREICH 3 BIS 120 µm

In dieser Arbeit werden Konzeption und Aufbau einer Infrarot-Kamera für den Wellenlängenbereich 3 - 120 µm vorgestellt. Diese Kamera wird im Rahmen des GIRL-Projekts am AIT (Astronomisches Institut Tübingen) angefertigt.
Das GIRL-Projekt ist ein IR-Observatorium (German-Infrared-Laboratory), das in Zusammenarbeit einiger deutscher Institute und Industriefirmen entsteht und 1987 mit einer Space Shuttle Fähre geflogen werden sollte.
Für die Vermessung der hochempfindlichen Detektoren, die das Herzstück der IR-Kamera bilden, sowie für die Untersuchungen an der zugehörigen Elektronik wurden Einrichtungen aufgebaut. Dazu mußten u.a. Kryostate konzipiert und angefertigt bzw. umgebaut werden.
Weiter wurden Detektoren samt Elektronik in ein spezielles Gehäuse integriert und ein für tiefe Temperaturen entwickelter Chopper vorgeschaltet. Diese Anordnung mußte dann im speziellen Kryostaten bei einer Temperatur von ca. 2 K getestet und vermessen werden. Die aufgestellten Spezifikationen der Kamera wurden erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1.0	Einleitung	2
2.0	Forderungen an eine IR-Kamera und Randbedingungen	4
3.0	Vorrausetzungen	5
3.1	Detektoren	5
3.1.1	Funktionsweise	6
3.1.2	Aufbau	9
3.1.3	Güte von IR-Detektoren	10
3.1.4	Rauschen	11
3.1.4.1	Johnson oder das thermische Rauschen	12
3.1.4.2	Generations- oder Rekombinations-Rauschen	12
3.1.4.3	1/f-Rauschen (Kontakt-Rauschen)	13
3.1.4.4	Spiking	14
3.1.4.5	Theoretisch erreichbare Grenzempfindlichkeit für Photoleiter	15
3.2	IR-Detektoren im elektrischen Kreis	16
3.2.1	MOS-FET-Schaltung (Metall-Oxyd-Sperschicht-Transistor)	17
3.2.2	J-FET-Schaltung (Junktion-Sprschicht-Transistor)	18
3.2.3	OP-Verstärker-Schaltung	19
3.3	Erzeugung von IR-Strahlung für Detektor- und Kamera-Tests	20
3.3.1	Schwarzer Körper für IR-Eichungen	21
3.3.1.1	Schwarzer Körper für Kryostat-Einsatz	22
3.3.1.2	Schwarzer Körper für Tauchrohreinsatz	24
3.3.2	Chopper	25
3.3.2.1	Schwingchopper	25
3.3.2.2	Torsions-Chopper	27
3.4	Kryoaufbau	28
3.4.1	Kryostataufbau	29
3.4.2	Testanordnung	29
3.4.2.1	Tauchvorrichtung für schnelle Voruntersuchungen an kalter Elektronik und IR-Detektoren	29
3.4.2.2	Meßkopf	31
3.4.2.3	Meßanordnung für Einsatz in einem Kryostaten	32
3.4.2.3.1	Baffle-System-Anordnung	32
3.4.2.3.2	Doppelbuchse-Anordnung	36

4.0	Detektormessungen und Untersuchungen an einzelnen Komponenten des TIA	37
4.1	NEP-Berechnung für eine spezielle Meßanordnung	38
4.2	IR-Detektormessungen	44
4.2.1	Si:Ga-IR-Detektor Nr. 7/7 6.7 von Battelle	45
4.2.2	Si:P -IR-Detektor NR-DS 13 von Battelle	47
4.2.3	Ge:Be-IR-Detektor NR-DS 62 von Battelle	50
4.2.4	Ge:Ga-IR-Detektoren	54
4.2.4.1	Ge:Ga-IR-Detektor Nr.C-319-5 von SBRC	55
4.2.4.2	Ge:Ga-IR-Detektor NR-DS 125 von Battelle	56
4.2.4.2.1	Vergleich der Ge:Ga Detektoren von SBRC und Battelle	59
4.3	Resümee aus allen Detektormessungen	60
5.0	Kamerakonzept	61
5.1	Wahl der IR-Detektoren für den Wellenlängenbereich 3-120 µm	61
5.2	Cut-On-Filter	63
5.3	Fokalebene der IR-Kamera und Multispektral-Bildentstehung	65
6.0	Aufbau des gekühlten Teils der IR-Kamera	69
6.1	Arrayplatten	73
6.2	Kamerakopf mit Vorverstärkerblock	77
6.3	Kameraboden mit Steckern	83
6.4	Kameragehäuse	84
6.5	Chopper mit Choppergehüse, Gestänge und Antrieb	85
6.6	Wärmeflüsse zu und innerhalb der Kamera	87
6.7	Eichquelle	92
7.0	Kameratests	93
7.1	Rütteltests einiger Kamerakomponenten	93
7.2	Testanordnung für Kameratests	95
7.3	Thermisches Verhalten der IR-Kamera	97
7.4	Bertieb der Detektoren innerhalb der Kamera	99
8.0	Zusammenfassung	101
9.0	Ausblick	103
	Literaturverzeichnis	104
	Abkürzungen	108
	Anhang	110

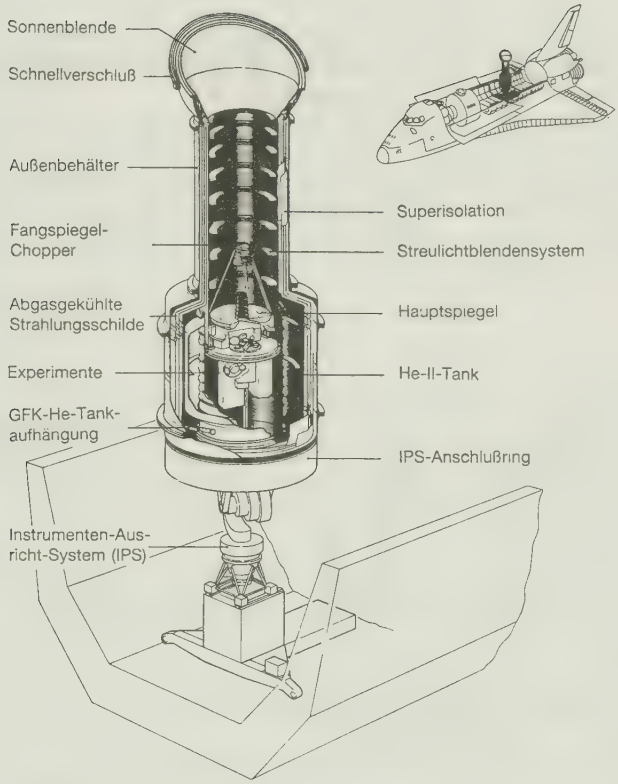


Abb.1 Das Infrarot-Laboratorium GIRL [Zeiss-Information]

1.0 Einleitung

Der Infrarotbereich $\lambda > 5$ µm ist für den größten Teil der astronomischen Beobachtung erst seit wenig mehr als 10 Jahren zugänglich. Die wesentliche Ursache liegt darin, daß erst seit Anfang der siebziger Jahre die Entwicklung der Halbleiterphysik so weit fortgeschritten war, daß für den Wellenlängenbereich $\lambda > 5$ µm genügend empfindliche Detektoren bzw. Bolometer zur Verfügung standen.
So wurde 1972 mit einer Serie von Raketenexperimenten, bei denen die neu entwickelten hochempfindlichen Detektoren ihren Einsatz fanden, eine Reihe neuer IR- Quellen entdeckt [Price, Walker].
Im Vergleich zu Photonen mit kürzerer Wellenlänge gelangt die IR-Strahlung gerade wegen ihrer größeren Wellenlänge weniger geschwächt von einer Quelle durch das interstellare Medium zu einem Beobachter. Allerdings ist die IR-Strahlung wegen der Absorptionseingenschaften der Erdatmosphäre mit erdgebundenen Teleskopen nur durch einige "Fenster" in dem Infrarotbereich zugänglich [Manno, Ring].

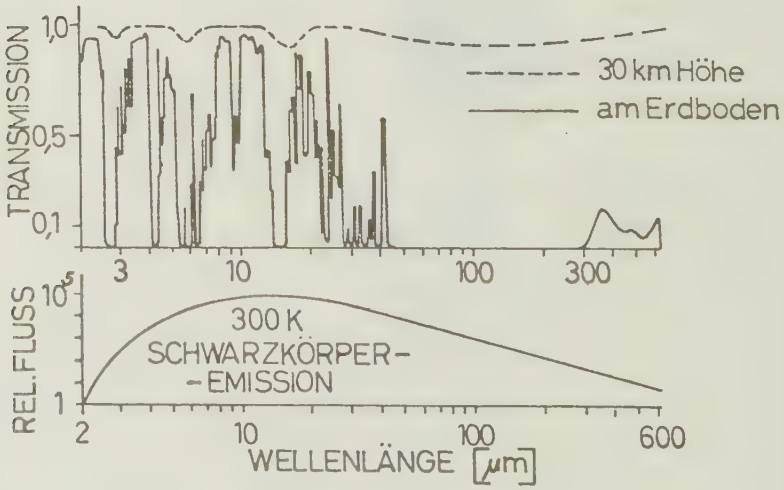


Abb.2 Transmission der Erdatmosphäre für Beobachtungen mit Boden-bzw. Balonteleskopen [Drapatz]

Erst ab einer Höhe von ca. 30.000 m ist die IR-Strahlung weitgehend ungeschwächt meßbar. Will man jedoch sehr schwache Objekte mit Detektoren der höchsten Empfindlichkeit (NEP $< 1 \times 10^{-16}$ $W/\sqrt{Hz}$) breitbandig photometrieren reicht diese Höhe wegen des zu hohen Hintergrunds, der von der Restatmosphäre herrührt, nicht aus [Drapatz]. Es muß sogar dafür gesorgt werden, daß der Photonenhintergrund des Teleskops selbst die Messung nicht beeinflußt. Dies bedeutet Kühlung des Teleskops.
Die IR-Astronomie ermöglicht die Beobachtung sowohl heißer als auch extrem kalter Objekte. So ist es z.B. möglich, Vorgänge in Gebieten der Sternentstehung zu studieren, aber auch Spektren verschiedener Moleküle zu untersuchen.
Neben den thermischen Prozessen, die zur Emission der IR-Strahlung führen und eine Temperaturbestimmung der Objekte ermöglichen, sind auch nichtthermischen Prozesse für die Aussendung dieser Strahlung verantwortlich. Zu den nichtthermischen Prozessen zählen etwa die Synchrotronstrahlung und die Comptonstreuung.
Nutzt man die Grenzempfindlichkeit der hochempfindlichen IR-Detektoren voll aus, erlaubt dies Beobachtungen von Dunkelwolken, Molekülwolken, HII-Regionen, Planetarischen Nebeln usw.
Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, im Rahmen des GIRL-Projekts [Lemke, Proetel] eine hochempfindliche IR-Kamera für den Wellenlängenbereich 3 - 120 µm zu konzipieren, zu entwickeln und aufzubauen. Diese sollte dann mit vier weiteren Experimenten im GIRL-Teleskop installiert und mit dem Space Shuttle in eine Umlaufbahn von ca. 425 km Höhe gebracht werden. Die spezielle Aufgabe der IR-Kamera ist ihr Einsatz zum Kartieren ausgedehnter Quellen mit höchster Empfindlichkeit.
Aus dem Vergleich der vier verschiedenen Signale in den vier verschiedenen Wellenlängenbändern, die durch vier Detektortypen gebildet werden und den Wellenlängenbereich 3 - 120 µm überdecken, wird es möglich sein, erste Aufschlüsse über die Temperaturverteilung der untersuchten Quellen zu erhalten. Die Winkelauflösung ergibt sich durch die Teleskopoptik und den Wellenlängenbereich, in dem gerade beobachtet wird.

2.0 Forderungen an eine IR-Kamera und Randbedingungen

Natürlich wird zunächst von einer Kamera verlangt, daß sie ein möglichst großes Gesichtsfeld mit guter Winkelauflösung hat, wobei in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen beobachtet werden kann, und es soll weitgehend ein lückenloses Bild eines Objektes entstehen.
Dieser Forderung sind jedoch Grenzen gesetzt. Das Gesichtsfeld ist durch die Voroptik (Spiegel, Blenden) des GIRL-Teleskops festgelegt und beträgt 582 x 1014 arc sec bzw 11,5 x 20 mm^2. Das tatsächliche Feld der Fokalebene des Teleskop ist zwar größer, jedoch wurde das Kamerafeld kleiner gewählt um Bildfehler am Rand zu vermeiden.
Die Beugungsscheibchen, die durch die Voroptik und die Wellenlänge des jeweiligen Bandes bestimmt werden, bestimmen auch die Detektorgröße für den jeweiligen Wellenlängenbereich. Da der Realisierung möglichst kleiner Abstände der Detektoren technische Grenzen gesetzt sind, ist die Packungsdichte der Detektoren im Gesichtsfeld auch deswegen begrenzt.
Auch der Preis der einzelnen Detektoren spielt eine nicht zu vernachlässigende Rolle, so daß man auch dadurch eingeschränkt ist.
Eine weitere Forderung an die IR-Kamera ist, daß die einzelnen Komponenten (OP's, Temperaturfühler, Heizer, Chopper) mit möglichst kleinen Verlustleistungen auskommen müssen (typisch 50 mW).
Weiter soll die Handhabung der Kamera möglichst einfach sein. Die einzelnen Komponenten (Detektoren, OP's,...) sollen leicht austauschbar sein, und es soll ein möglichst hoher Grad am Modularität vorhanden sein.
Es wird weiter gefordert, daß die entsprechenden Temperatur-Niveaus (z.B. für die Ge:Ga-Detektoren T= 2 K) erreicht werden können.
Um wirklich nur Strahlung von einer Quelle messen zu können, muß für Lichtdichtheit der Kamera gesorgt werden. Dies betrifft sowohl die Lichtdichtheit der Kamera gegenüber der Umgebung als auch innerhalb der Kamera selbst.

3.0 Vorrausetzungen

Die Halbleitertechnologie ist erst in den letzten Jahren so weit fortgeschritten, daß Photodetektoren gebaut werden können, die gerade im Wellenlängenbereich 3 - 120 µm so empfindlich sind, daß sie an die theoretisch erreichbare Empfindlichkeit (Blip-Grenze, siehe Seite 15) stoßen.
Zur Untersuchung der Eigenschaften der o.g. Detektoren war es notwendig, entsprechende Apparaturen aufzubauen. So mußten etwa Kryostate angefertigt bzw. umgebaut werden, um mit speziellen IR-Strahlungsquellen die auf LHe-Temperatur gekühlten Detektoren auf geeignete Weise bestrahlen zu können.
Bei konstanter Bestrahlung eines IR-Detektors mit IR-Photonen weisen die Detektorsignale eine Drift auf. Diese Drift spielt bei modulierter Bestrahlung der Detektoren keine Rolle (AC-Modus). Für diesen Zweck mußte ein auf LHe-Temperatur gekühlter Chopper entwickelt werden.
Schließlich wurde nach geeigneten Vorverstärkern gesucht, die möglichst rauscharm arbeiten und sich in unmittelbarer Nähe der Detektoren befinden. Solche Verstärker können entweder nur auf LHe-Temperatur oder in einem speziell abgekoppelten Gehäuse auf einen höheren Temperatur als LHe gekühlt werden. Ein Betrieb der Vorverstärker bei höherer Temperatur als Badtemperatur bringt sowohl Wärmeleitungs- als auch Strahlungsprobleme mit sich.
Bevor im Kap.5 der Aufbau der Kamera im Detail erläutert wird, soll in den folgenden Kapiteln auf die einzelnen Bauelemente und Baugruppen, sowie auf die Meß- und Testapparatur genauer eingegangen werden.

3.1 Detektoren

Im folgenden Abschnitt soll nicht die gesamte Theorie der IR-Detektoren behandelt werden, wie sie etwa in [Keyes] dargestellt ist. Vielmehr sollen nur die grundlegenden Prinzipien erklärt werden und einige Begriffe, die notwendig für eine Bestimmung der Güte dieser Detektoren sind, erläutert werden. Da in unserer Kamera nur Photoleiter Verwendung finden, soll die Darstellung sich auf diesen Typ beschränken.

3.1.1 Funktionsweise

Photoleiter sind Störstellenhalbleiter. Sie bestehen aus Kristallen der IV. Gruppe des Periodensystems (z.B. Si, Ge), die mit Elementen der III. bzw. V. Gruppe des Periodensystems (z.B. As, Be, Ga, P) dotiert werden. Durch die Dotierung entstehen im Verhältnis zu reinen Halbleitern leicht ionisierbare Niveaus, die durch eingestrahlte Photonen mit der Energie $h \cdot \nu$ (h - Planckscher Wirkungsquantum, ν - Frequenz des eingestrahlten Lichtes) ionisiert werden [Teichmann].

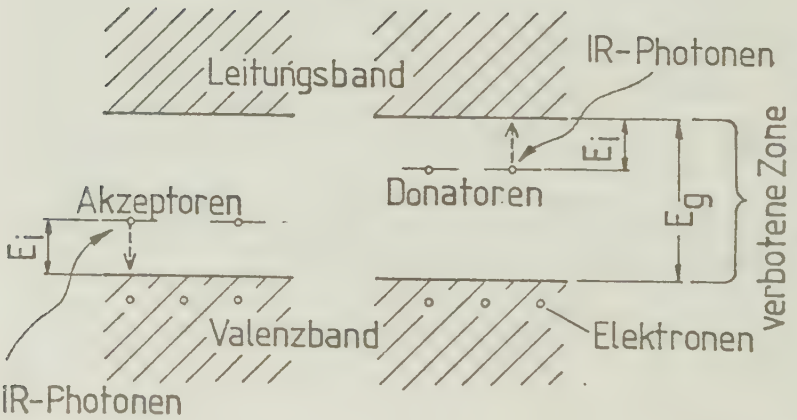


Abb.3 Energieschema von Störstellenhalbleiter (zur Ionisation einer Störstelle genügt die Photonenenergie $E_i = h \times c/\lambda_i$ λ_i - Wellenlänge der eingestrahlten Photonen)

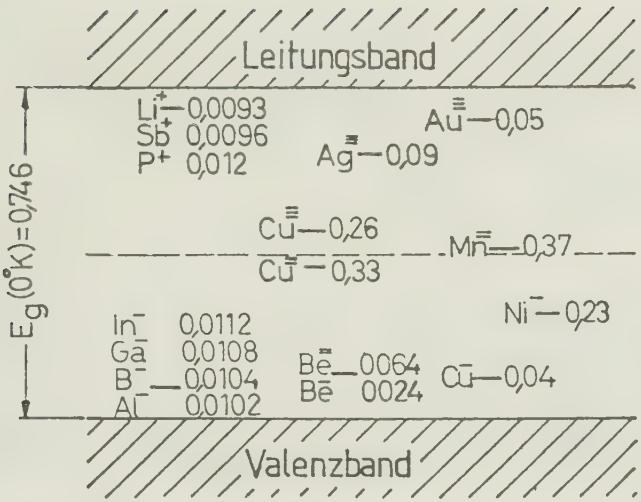


Abb.4 Energieniveaus (Störstellen) im Ge. Der Bandabstand ist in eV gemessen.

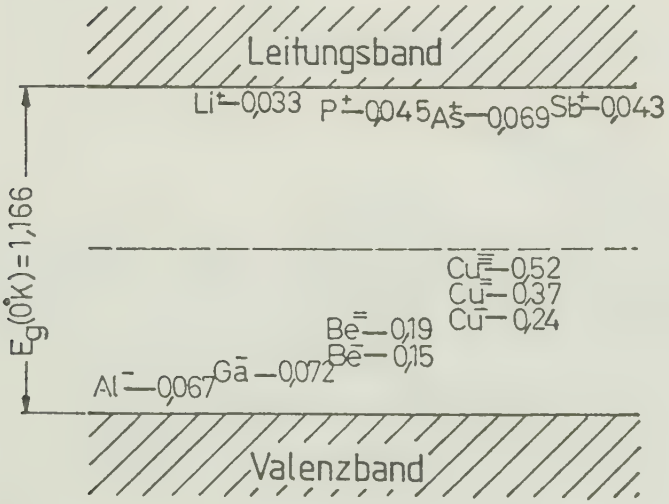


Abb.5 Energieniveaus (Störstellen) im Si. Der Bandabstand ist in eV gemessen.

Um die IR-Strahlung mit Photoleitern registrieren zu können, muß der Bandabstand der Störstellenniveaus zum Leitungsband der Beziehung

(1) $E_i \leq h \times c/\lambda$

genügen.

c : Lichtgeschwindigkeit [3×10^8 m/s]
λ : Wellenlänge des Lichts
h : Plancksches Wirkungsquantum [$6{,}6 \times 10^{-34}$ Js]

Im Infraroten ist dieser Abstand so gering, daß bereits die thermische Energie k x T ausreicht, um die Niveaus bei Raumtemperatur anzuregen. Es muß gelten

(2) $k \times T < E_i$,

damit der Detektor zum Strahlungsnachweis verwendet werden kann. Hierzu ist also eine Kühlung des Detektors notwendig.

k : Boltzmann-Konstante [$1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K]
T : Temperatur

Bei einer Wellenlänge von 28 µm beträgt die Photonenenergie $h \times \nu$, 0,045 eV. Durch geeignete Wahl der Dotierung kann ein weiter Bereich der IR-Strahlung überdeckt werden. Dabei gibt es bei einem Störstellenphotoleiter eine Grenzwellenlänge λ_c, bis zu der die Photonenenergie ausreicht, um das ganz bestimmte Störstellenniveau anzuregen.

λ_c : cut-of-Wellenlänge

Tab.1

Übersicht über IR-Detektoren. Die maximale Stromempfindlichkeit erreichen die Detektoren dicht unterhalb λ_c

Material	λ_c [µm]	Dotierung	E_i [eV]
Si:In	7	p	0,16
Si:Ga	17	p	0,072
Si:As	23	n	0,054
Si:P	28	n	0,045
Si:Sb	29	n	0,043
Ge:Cu	31	p	0,040
Ge:Be	52	p	0,024
Ge:Ga	120	p	0,0108

Für die Grenzwellenlänge λ_c gilt

(3) $\lambda_c = 1{,}24/E_i$ [µm]

E_i in [eV]

3.1.2 Aufbau

Für die Herstellung der o.g. Photodetektoren sind Si- bzw. Ge-Kristalle höchster Reinheit notwendig. Die Verunreinigung in den Ausgangsmaterialien Ge oder Si darf 10^{13} Fremdatome/cm^3 (≙ relative Zahl 10^{-11}) nicht übersteigen. Für die Dotierung der Kristalle gibt es verschiedene Methoden, z.B. die Czochralski-Methode [Norton]. Bei diesem Verfahren werden beim Wachstum eines Ge-Kristalls in der (111)-Richtung Dotierungsatome eingebaut [Willardson, Beer], wobei das Wachstum beim Germanium in der horizontalen Lage, beim Si in der vertikalen Lage vor sich geht. Der Kristall befindet sich in einem Quarzofen. Die Herstellung der Detektoren wird auch in [Battelle Bericht] beschrieben. Einen wesentlichen Einfluß auf die Detektorgüte haben die Kontakte. Die Kontaktierung geschieht in mehreren Schritten. Nach einer Ionenimplantation in die Detektoroberfläche wird eine ca. 0,4 µm dicke Al-Schicht aufgedampft und anschließend zwei Stunden bei 200°C unter Formiergas getempert.
Da sich über der implantierten Schicht unvermeidlich eine Al-Oxydschicht bildet, wird der El.-Kontakt über eine kleine Menge Gold/Antimon

hergestellt, die vor der Montage im Vakuum bei ca. 800°C in den Kristall kurzzeitig eingeschmolzen wird [Battelle Bericht]. Der so behandelte Detektor kann anschließend auf ein vergoldetes Gehäuse (Cu, Saphir) mit einem leitfähigen Kleber geklebt werden. Siehe dazu Abb. 6.

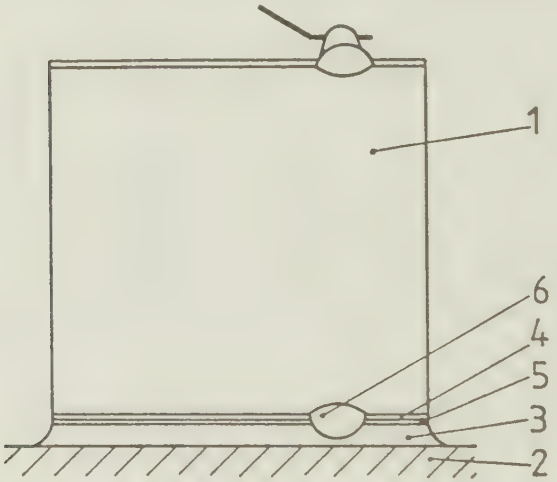


Abb.6 Kontaktaufbau eines Si:P-Detektors

1: Detektorkristall
2: vergoldete Gehäuseplatte
3: leitfähiger Kleber
4: ionenimplantierte Kontaktfläche
5: oxidbehaftete Oberflächenschicht
6: eingetemperter Au/Sb-Kontakt

3.1.3 Güte von IR-Detektoren

Die Güte von IR-Detektoren wird im wesentlichen durch zwei Größen bestimmt. Es ist der NEP-Wert (Noise equivalent power oder äquivalente Rauschleistung) der in W angegeben wird, und es ist die Stromempfindlichkeit oder Responsivity R^* angegeben in V/W bzw. in A/W. Der NEP-Wert gibt die Strahlungsleistung an, die an einem Detektor ein Signal- zu Rausch-Verhältnis von eins erzielt. Aus der Statistik folgt, daß die Rauschspannung proportional zur Wurzel aus der Bandbreite Δf ist. Aus diesem Grund und um die IR-Detektoren besser miteinander vergleichen zu können, wird für den NEP-Wert sehr häufig die Einheit $W/\sqrt{Hz}$ verwendet.

Es gilt

(4) NEP = $P_{RMS} \times U_R / U_S \times \Delta f^{1/2}$ [W/$\sqrt{Hz}$] [Incter et al.]

[Kruse, McGlauchlin, McQuistan]

P_{RMS}: eingestrahlte Leistung [W] (vom Detektor verarbeitet)
U_S : Detektorsignal [V]
U_R : Detektorrauschen [V]
Δf : el. Bandbreite [Hz] (bei uns ist Δf = 1 Hz)

Oft wird der Begriff der Detectivity [Levinstein, Mucer] verwendet.

(5) D = 1/NEP [$\sqrt{Hz}$/W]

Die zweite wichtige Größe ist die Stromempfindlichkeit R^*. Sie gibt das Verhältnis des elektrischen Signals zur eingestrahlten Leistung wieder [Hudson].

(6) $R^* = U_S/(R_D \times P_{RMS})$ [A/W]

Die theoretisch erreichbare Grenzempfindlichkeit hängt im wesentlichen vom Rauschen des Detektors selbst bzw. vom Rauschen der Elektronik ab.

3.1.4 Rauschen

Im folgenden Abschnitt sollen einige Begriffe zum Rauschen erklärt werden. Man unterscheidet je nach Entstehung mehrere Rauscharten, wobei für unsere Anwendung nur einige eine wesentliche Rolle spielen [Clark]. In Tab. 2 sind einige Rauscharten, die bei Detektoren allgemein eine Rolle spielen, aufgezählt (aus [Clark]).

Tab.2

An Photodetektoren beteiligte Rauscharten und deren physikalische Mechanismen

Rauschart	Detektortyp	physikalischer Mechanismus
Johnson-Rauschen	alle Detektoren	thermische Bewegung der Ladungsträger
Temperaturrauschen	thermische Detektoren	Temperaturfluktuation
Strahlungsrauschen	alle Detektoren	Bose-Einstein-Fluktuation der Strahlungsphotonen
Gener.-Rekomb.Rausch.	Photoleiter,Bolometer	Fermi-Dirac-Fluktuation der freien Ladungsträger
Modulationsrauschen	"	Widerstandsänderung im Halbleiter
Kontaktrauschen	"	Widerstandsänderung der Kontakte

Die aufgelisteten Rauschanteile sind nicht streng disjunkt. Für photoleitende Detektoren spielen folgende Rauschanteile eine Rolle:

3.1.4.1 Johnson- oder thermisches Rauschen

Die Rauschspannung wird definiert als

(7) $$U_R = \sqrt{4kT \times R' \times \Delta f}\ [V]$$

R' : el. Widerstand [Ohm]

Der physikalische Mechanismus,der hinter dieser Rauschart steckt, ist die Abhängigkeit der Beweglichkeit der el.Ladungsträger von der Temperatur.

3.1.4.2 Generations- und Rekombinations-Rauschen

Dieses Rauschen entsteht durch die Fluktuation der Erzeugung und Rekombination der freien Ladungsträger im Halbleiter.

Die Ursache dieser Fluktuation ist entweder die statistische Änderung des Photonen-Flusses (Hintergrunds), das sogenannte Photonen-Rauschen, oder sie beruht auf der Fluktuation der Halbleitertemperatur.
Beim Photonen-Rauschen gehorchen die Photonen der Bose-Einstein-Statistik. Es ergibt sich für den Rauschstrom i_R

(8) $$i_R = e \times G \times \sqrt{4 \times \Delta f \times Q \times n} \quad [A]$$

e : Elementarladung $e = 1{,}6021892 \cdot 10^{-19}$ A·s
G : "Gain" Photonenleistungsverstärkung
Q : Photonenhintergrundsfluß [Ph/(cm^2·s)]
n : Quantenwirkungsgrad [cm^2]

Das durch die Fluktuation der Halbleitertemperatur entstehende Rauschen spielt bei Photoleitern, die auf Temperaturen < 4,2 K gekühlt werden, keine Rolle und soll hier nicht weiter betrachtet werden.

3.1.4.3 1/f-Rauschen (Kontakt-Rauschen)

1/f-Rauschen tritt in Erscheinung bei niedrigen Frequenzen. Seine Ursache ist nicht völlig geklärt. Es wird vermutet, daß es durch das Vorhandensein von Potentialbarrieren an Kontaktflächen der Halbleiter entsteht. Der Rauschstrom wird definiert durch

(9) $$i_R = \sqrt{K \times I^x / f^y}$$

I : Strom im Kreis
f : Frequenz
K : Konstante (experimentell)
x ~ 2
Konstanten
y ~ 1

Aus der Abb.6 kann das Gesamtrauschen entnommen werden.

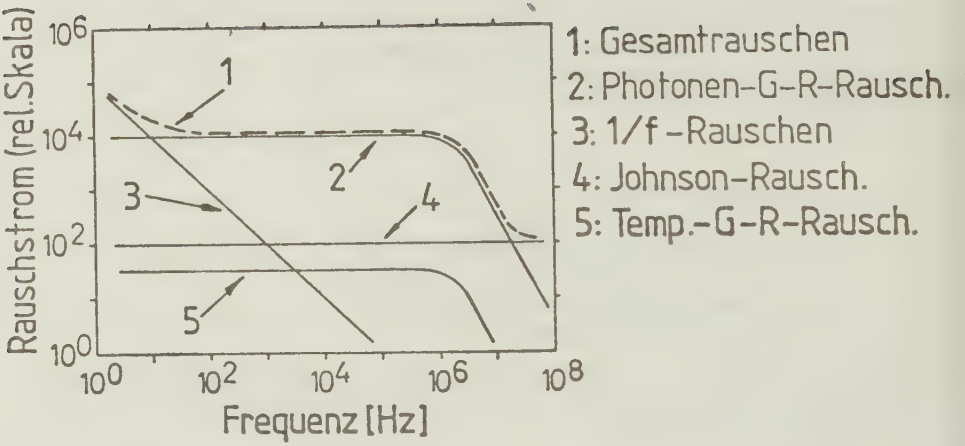


Abb.6 Zusammensetzung des Gesamtrauschen eines Detektors

Man sieht, daß im Bereich von 10 Hz das Gesamtrauschen im wesentlichen durch das Photonen-und das 1/f-Rauschen bestimmt wird. Bei den von uns eingesetzten IR-Detektoren ist die Beschaffenheit der Kontakte so, daß das 1/f-Rauschen bis herunter zu 2 Hz keine wesentliche Rolle spielt. Wird der Detektor nicht bestrahlt, ist nur das Johnson-Rauschen bestimmend. Neben den aufgezählten Rauscharten gibt es bei Photoleitern ein sogenanntes "Spiking".

3.1.4.4 Spiking

Durch hochenergetische Photonen (Teilchen) können Ladungsträger in so hoher Anzahl im Kristall erzeugt werden, daß es zum Zusammenbruch der Detektorspannung kommen kann. Allgemein entstehen im Millisekundenbereich Spitzen, die von der Höhe der Vorspannung und der Stärke des Hintergrundes abhängen.
Da die Detektorgröße und das Detektormaterial (Dotierungsdichte) Einfluß auf die Höhe derjenigen Detektorspannung haben, bei der das Signal-Rauschverhältnis ein Maximum hat, haben Detektorgröße und Detektormaterial auch Einfluß auf die Häufigkeit und Höhe der Spikes.

3.1.4.5 Theoretisch erreichbare Grenzempfindlichkeit für Photoleiter

Man unterscheidet hier zwischen dem BLIP- und dem PLIP-Fall (Background Limited Infrared Photoconductor bzw. Preamplifier Limited Infrared Photoconductor)

Beim NEP_{BLIP} überwiegt das Photonenrauschen des Detektors

Beim NEP_{PLIP} überwiegt das Rauschen der Elektronik. Das Rauschen ist durch das thermische Rauschen des Lastwiderstandes R_L gegeben, falls $R_L << R_D$, R_D: Detektorwiderstand

Aus dem nachstehenden Diagrammm Abb. 7 kann die NEP_{BLIP}- und NEP_{PLIP}-Grenze entnommen werden. Man sieht, daß man mit einem ungekühlten Teleskop eine relativ niedrige Empfindlichkeit hat, dagegen verbessert sich die Empfindlichkeit bei einem auf 10 K gekühlten Teleskop um mehrere Zehnerpotenzen.

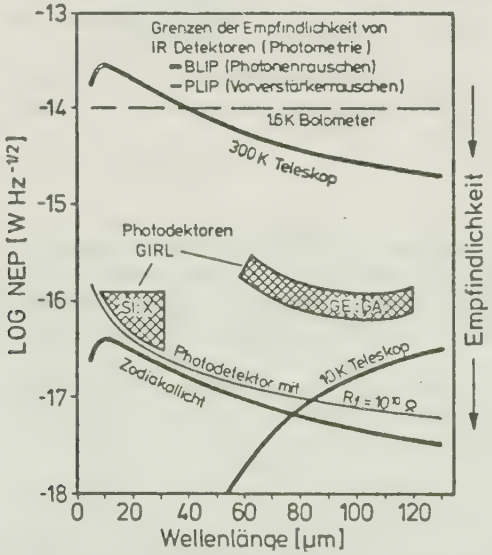


Abb.7 Wellenlängenabhängigkeit der Empfindlichkeit für IR-Detektoren bei photometrischen Anwendung. Zu erkennen sind die Grenzen, die sich z.B. bei einem ungekühlten Teleskop ergeben bzw. die Zodikallichtgrenze, die bei allen astronomischen Beobachtungen besteht.

3.2 IR-Detektoren im elektrischen Kreis

Wie erwähnt, haben Photoleiter bei Kryotemperaturen, bei denen der Bandabstand zwischen Störstellenniveau und Leitungsband größer oder gleich der thermischen Anregungsenergie k.T ist, einen sehr hohen ohmschen Widerstand.
Der Widerstand eines nichtbestrahlten, auf 4,2 K gekühlten Detektors kann bis zu 10^{14} Ohm betragen, und dieser verhält sich dadurch nahezu wie ein Isolator. Bei angelegter Spannung am Detektor und bei Bestrahlung mit Photonen der Wellenlänge $\lambda < \lambda_c$ ändert sich dieser Widerstand um mehrere Zehnerpotenzen. Diese Widerstandsänderung muß nun in eine Spannungsänderung umgesetzt werden [Tietze, Schenk], die dann durch geeignete Nachfolgeelektronik registriert und ausgewertet werden kann [Jaacks].
Da neben dem hohen Detektorwiderstand auch die Kapazität der einzelnen Komponenten eine wichtige Rolle spielt, sind längere Leitungen auch gegenüber sogenannter Mikrophonie empfindlicher. Dies bedeutet, daß die erste Verstärker-Stufe der Elektronik sich in unmittelbarer Nähe der Detektoren befinden muß. Um bei diesem hohen Detektorwiderstand bis zu $R_D = 10^{14}$ Ohm den resultierenden sehr kleinen Strom messen zu können, muß die Schaltung hinter dem Detektor als Trans-Impedanzwandler (TIA) gestaltet werden [Wyatt, Baker, Frodsham]. Bei der Wahl der einzelnen Komponenten muß neben dem Eingangswiderstand auch auf die Kapazitäten geachtet werden. Diese bewegen sich im Bereich (0,01-1 pF). Die genauen Zusammenhänge zwischen diesen Kapazitäten und dem Rauschen der Schaltung sind bei [Frick] beschrieben.
Ein TIA ist eine negativ rückgekoppelte Verstärkerschaltung [Frick], die hier in drei von uns untersuchten Varianten kurz diskutiert werden soll. Für die praktische Realisierung einer TIA-Schaltung ist es notwendig, daß der Verstärker bei sehr niedrigen Temperaturen funktionsfähig ist. Dies erfüllen nur wenige Transistoren bzw. Operationsverstärker.

3.2.1 MOS-FET-Schaltung (Metall-Oxyd-Sperrschicht-Transistor)

Bei diesem Impedanzwandler wurde ein Transistor des Typs M 108 oder 3N191 verwendet.

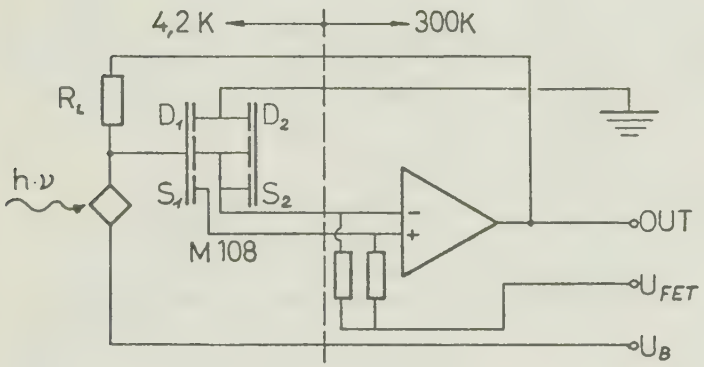


Abb.8 MOS-TIA-Schaltung

Der Vorteil dieser Schaltung ist, daß die MOS-FET's bei einer Temperatur um 4 Kelvin noch als Transistoren funktionieren. Natürlich verschieben sich die Transistorkennlinien. Die Verlustleistung ist so gering, daß man keine aufwendigen Vorkehrungen treffen muß, um den Transistor in ein lichtdichtes vom Detektor abgekoppeltes Gehäuse zu platzieren.
Der Nachteil dieser Schaltung ist ein höheres Gesamtrauschen. Speziell bei beiden Transistortypen M 108 und 3N191 lag das minimal erreichbare Rauschen bei einer Gesamtschaltungstemperatur von 4,2 K bei 4 µV. Das Johnson-Rauschen am Ladewiderstand bei $R_L = 2 \times 10^{10}$ Ohm und einer Temperatur von 4,2 K liegt bei 2 µV. Durch dieses relativ hohe Eigenrauschen der Transistoren kann die Empfindlichkeit des Detektorkreises bis zu einem Faktor zwei verschlechtert werden. Ein weiterer Nachteil ist, daß beim Nichtbetrieb die Ladungsträger des Transistors bei LHe-Temperatur ausfrieren und der Transistor dann nicht mehr betriebsfähig ist. Abhilfe kann durch kurzes Aufheizen des Transistors geschaffen werden.

3.2.2 J-FET-Schaltung (Junktion-Sperrschicht-Transistor)

Bei dieser Schaltung ist das Gesamtrauschen des Vorverstärkers gleich dem Johnson-Rauschen vom R_L bei einer Temperatur von 4,2 K.

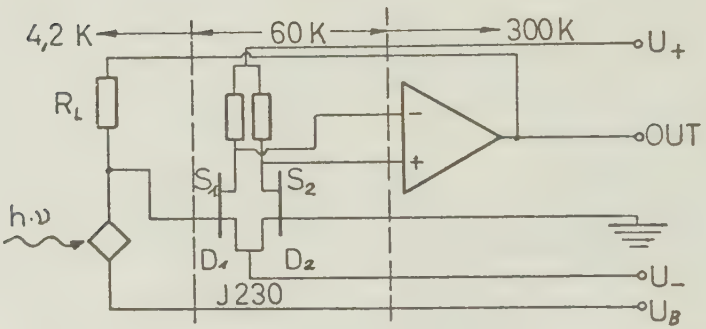


Abb.9 J-FET-TIA-Schaltung

Als Impedanzwandler wurde hier der J-FET 2N3958 verwendet. Es gibt eine Anzahl anderer J-FET-Typen, die oft verwendet werden, z.B. der Typ J 230 [Wolf].
Ein Nachteil beim Einsatz eines J-FET in einem Impedanzwandler liegt darin, daß der Transistor bei einer Temperatur zwischen 60 bis 70 K betrieben werden muß. Dies bedeutet, da sich der Transistor in Detektornähe befinden soll, eine gute thermische und optische Abkopplung des Transistors.

3.2.3 OP-Verstärker-Schaltung

Auch hier muß die Impedanzwandlung wegen der Mikrophonie der hochohmigen Leitungen direkt am Detektor und Ladewiderstand stattfinden. Die zwei vorherigen Schaltungen führen hinter dem Impedanzwandler die immer noch relativ hochohmigen Differenzsignale zur nächsten Verstärkerstufe über lange Leitungen. Die OP-Schaltung vermeidet diesen Nachteil weitgehend. D.h. die Ausgangsimpedanz ist wesentlich niedriger als bei den oben beschriebenen Transistorschaltungen. Auch bei diesem Schaltungstyp ist wie bei der J-FET-Schaltung eine optische und eine thermische Abkopplung des Operationsverstärkers notwendig. Die Betriebstemperatur liegt bei dem von uns verwendeten Typ LF 441 im Bereich zwischen 55 und 70 K [Jaacks].

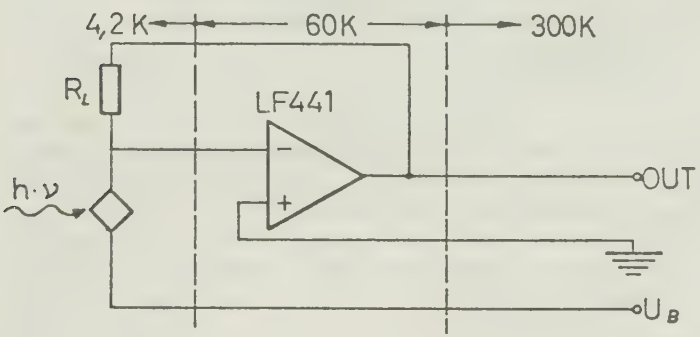


Abb.10 OP-Verstärker-Schaltung

Man erreicht auch in diesem Fall ein Gesamtrauschen, daß nur durch das Johnson-Rauschen des Ladewiderstandes bestimmt wird.
Ein weiterer Vorteil dieser Schaltung liegt darin, daß pro Kreis zwei Leitungen weniger benötigt werden.
Dieser Vorteil wird vor allem bei einer Kamera deutlich, die eine größere Anzahl von Detektorkreisen besitzt. Jede elektrische Leitung bedeutet auch eine thermische Leitung, die die Kühlung der Kamera beeinträchtigt. Für die IR-Kamera haben wir uns für diesen Schaltungstyp mit dem Operationsverstärker LF-441 entschieden.

3.3 Erzeugung von IR-Strahlung für Detektor- und Kameratests

Jeder Körper strahlt nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz elektromagnetische Strahlung ab [Stumpf, Rieckers].
Es gilt für die abgestrahlte Leistung

(10) $$P_{bb} = (2\pi^5 \times k^4)/(15\, c^2 h^3) \times \varepsilon \times T^4 \times F$$

$$= \sigma \times \varepsilon \times T^4 \times F \quad [W]$$

σ : Stefan-Boltzmann-Konstante = $5{,}7 \times 10^{-12} W/cm^2K^4$
ε : Emissionsgrad (bei einem Hohlraumstrahler $\varepsilon = 1$)
T : Temperatur des Strahlers in Kelvin
F : strahlende Fläche [cm^2]

Der Strahlungsfluß nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ergibt sich aus der Integration des Planckschen Strahlungsgesetzes. Das Wiensche Verschiebungsgesetz stellt den Zusammenhang zwischen der Temperatur des Strahlers und der Wellenlänge dar, bei der das Maximum der Emission liegt.

(11) $\lambda_{max} \times T = 0{,}2898$ cm x Kelvin

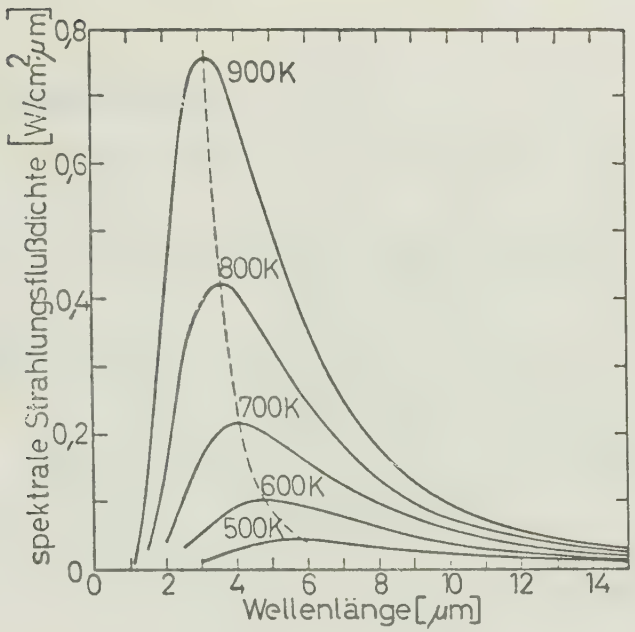


Abb.11 Das Plancksche Strahlungsgesetz

In der folgender Tabelle sind Daten eines schwarzen Körpers für verschiedene Temperaturen aufgeführt. Dabei soll die strahlende Fläche $F = 1\ mm^2$ betragen.

Tab. 3

Temperatur	Abgestrahlte Leistung	Wellenlänge λ_{max}
[K]	[W]	[µm]
1	$5{,}67 \times 10^{-14}$	2898
10	$5{,}67 \times 10^{-10}$	289,8
100	$5{,}67 \times 10^{-6}$	28,98
300	$4{,}59 \times 10^{-4}$	9,6

3.3.1 Schwarzer Körper für IR-Eichungen

Da der IR-Detektor sich in einem Kryostaten auf einem Temperaturniveau von typisch 4 K befinden muß, gibt es für die Erzeugung der IR-Strahlung im Bereich 3 - 120 µm zwei Möglichkeiten. Entweder bestrahlt man den Detektor im Inneren des Kryostaten mit einem "kalten Schwarzer Körper", der auf eine

bestimmte Temperatur erwärmt wird, oder von außen durch geeignete Fenster und Filter mit einem heißen Schwarzen Körper. Beide Anordnungen haben Vor- und Nachteile.
Verwendet man einen "kalten SK", ist eine genaue Temperaturmessung des SK notwendig, und falls modulierte Strahlung benötigt wird, wird ein Chopper, der bei Kryobedingungen arbeitet, benötigt. Da bei NEP-Messungen der NEP-Wert etwa proportional T^5 ist, bedeutet, je nach Detektortyp und Temperaturbereich, eine Temperaturabweichung vom 1 K einen Fehler von typisch 10-50%.
Bei einem "heißen SK" kann dagegen ein kommerziell käuflicher Chopper verwendet werden. Die Handhabung eines heißen SK und zugehörigen Choppers ist relativ einfach. Der Nachteil bei einem "heißen SK" ist, daß die Eigenschaften der verwendeten Filter sehr genau bekannt sein müssen, da sie insgesamt eine Abschwächung um ca. 6 Größenordnungen bewirken sollen.
Wir haben uns für einen "kalten SK" entschieden. Bei diesem SK-Typ ist die Temperaturbestimmung auf etwa 0,3 K möglich. Während der Messung kann durch die Temperaturänderung λ_{max} und die emittierte Leistung variiert werden. Ein weiterer Vorteil ist, daß der Photonen-Hintergrund auf nahezu Null gedrückt werden kann, da die Umgebung der gesamten Testanordnung (Detektor, Elektronik, Chopper, SK) auf dem Temperaturniveau von LHe liegt.
Es wurden zwei "kalte-SK"-Typen entwickelt und eingesetzt.

3.3.1.1 Schwarzer Körper für Kryostat-Einsatz

Dieser SK-Typ ist im wesentlichen ein Hohlraumstrahler, der im Inneren geschwärzt ist (3M9005-Farbe).
Um eine schnelle Aufheizung zu erreichen, ist dieser Hohlraum sehr dünnwandig (0,2 mm). Die Aufheizung geschieht über einen auf das Gehäuse gegenläufig gewickelten, isolierten, 0,1 mm starken Konstantandraht. Die Temperatur wird mit einer an das Gehäuse gut thermisch angekoppelten Diode gemessen. Es ist wichtig, daß auch die Zuleitungen der Diode bereits die SK-Temperatur annehmen, damit die Temperaturmessung nicht verfälscht wird. Zu diesem Zweck werden die Zuleitungen, die aus einem 0,1 mm starken isolierten Manganindraht bestehen, auf die untere Hälfte des SK ebenfalls gegenläufig gewickelt. Als Diode wird der Typ DT 500 der Firma Cryogenics verwendet, die in Vierpunktmessung betrieben wird.
Der so beschaffene SK wird thermisch über eine Teflonplatte und eine Buchse von der Umgebung abgekoppelt. Um das Innenteil - Abb.12 - wird eine auf LHe-Temperaturniveau befindliche zweite Buchse angeordnet, deren Öffnung die eigentliche strahlende Fläche darstellt.

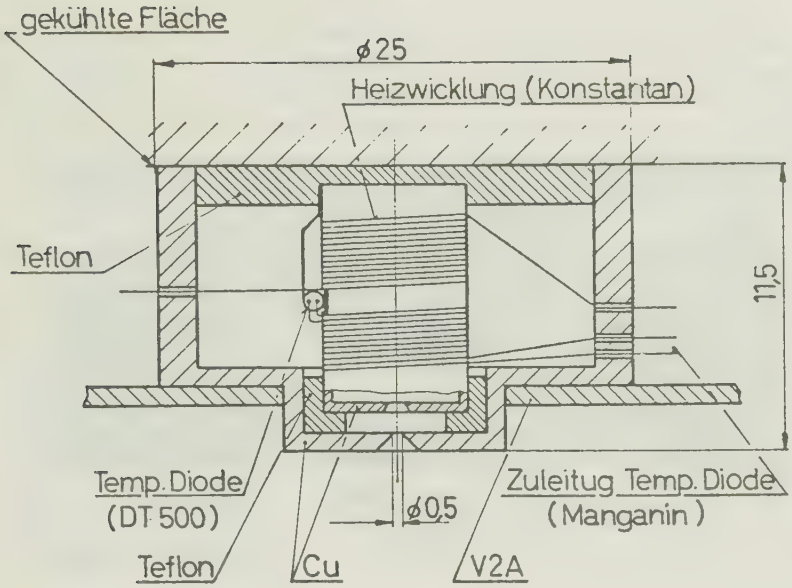


Abb.12 Anordnung eines kalten Schwarzen Körpers

Der Hersteller der Diode DT-500, die im Zusammenhang mit dem Gerät DRC 70 C des gleichen Herstellers betrieben wird, gibt die Genauigkeit der Messung auf ± 0,3 K an.
Vor Inbetriebnahme ist eine Eichung des SK notwendig. Dies wurde bei LN_2-Temperatur und LHe durchgeführt, wobei die Abweichung um ± 0,3K bestätigt wurde. Dieser Fehler in der Temperatur beeinflußt die Genauigkeit der gesamten Messung mit ca 8%.
Sowohl die Aufheizung, als auch die Temperaturmessung kann wahlweise entweder über das Gerät DRC 70 C der Firma Cryogenies oder über den Experiment-Prozessor M68000 betrieben werden.

3.3.1.2 Schwarzer Körper für Tauchrohreinsatz

Für schnelle Detektorvergleichsmessungen wurde ein SK entwickelt, der ohne Choppereinsatz eine modulierte Strahlung erzeugt. Die Erzeugung der Strahlung (keine reine SK-Strahlung) geschieht über die Aufheizung eines Wolframdrahtes mit sehr langsamer Wechselspannung (typisch 0,1-10 Hz) [Pribil].

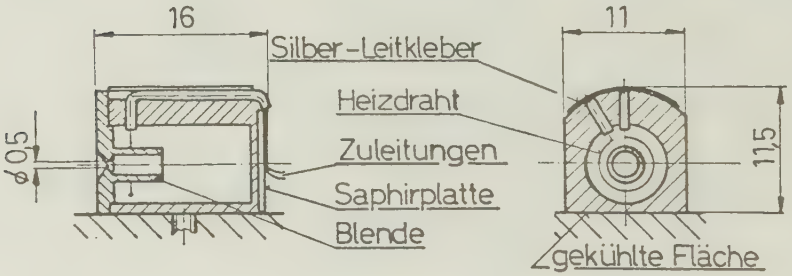


Abb.13 Schnitt duch einen SK für Tauchrohreinsatz

Wichtig bei dieser Anordnung ist die Kühlung des Drahtes an den Drahtenden. Die Zuleitungen werden an der Rückseite des SK auf ein Saphirplättchen geklebt und dadurch an das LHe-Bad gut thermisch angekoppelt. Um möglichst schwarze Strahlung zu erhalten und die abgestrahlte Leistung zu reduzieren, wird durch einen Blenden-Vorbau die direkte Abstrahlung verhindert. Auch bei diesem SK wird das Innere geschwärzt, die innere Rückseite jedoch matt vergoldet.Mit dieser Anordnung wird der emittierte Strahlungsfluß um etwa vier bis fünf Größenordnungen reduziert. Die von einem solchen SK abgegebene Leistung läßt sich nur näherungsweise theoretisch berechnen [Stumpf, Rieckers]. Es ist daher notwendig, diesen SK mit bekannten, bereits vermessenen Detektoren zu eichen.

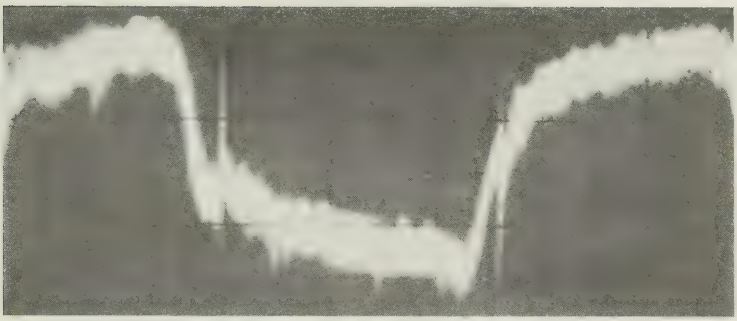


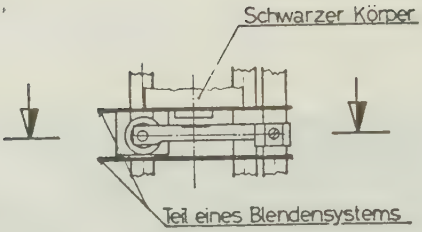
Abb.14 Ein typisches Signal an einem Si:As-Detektor
bei einer Modulationsfrequenz von 0,2 Hz.

3.3.2 Chopper

Ein großes Problem unserer Kryoanordnung bestand darin, einen Chopper zu entwickeln, der bei 4,2 K mit einer kleinen Leistungsaufnahme (< 3 mW) betrieben werden kann und der selbst eine Temperatur über 6 - 10 K nicht überschreitet. Zur Vermessung einzelner Detektoren wurde ein Schwing-Chopper verwendet, der direkt hinter einer SK-Quelle angeordnet werden kann.
Für die IR-Kamera selbst wurde ein Torsions-Chopper entwickelt, dessen Blatt sich in der Fokalebene befindet.

3.3.2.1 Schwing-Chopper

Das relativ einfache Prinzip dieses Choppers ist in Abb.15 dargestellt. Eine wesentliche Schwierigkeit dieser Entwicklung bestand in der niedrigen Frequenz von ca. 10 Hz bei sehr kleinen geometrischen Abmessungen. Aus diesem Grund sind auch kommerziell erhältliche Chopper nicht einsetzbar.



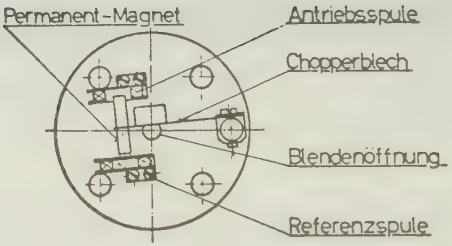


Abb.15 Schwing-Chopper für einen Einsatz bei Kryobedingungen

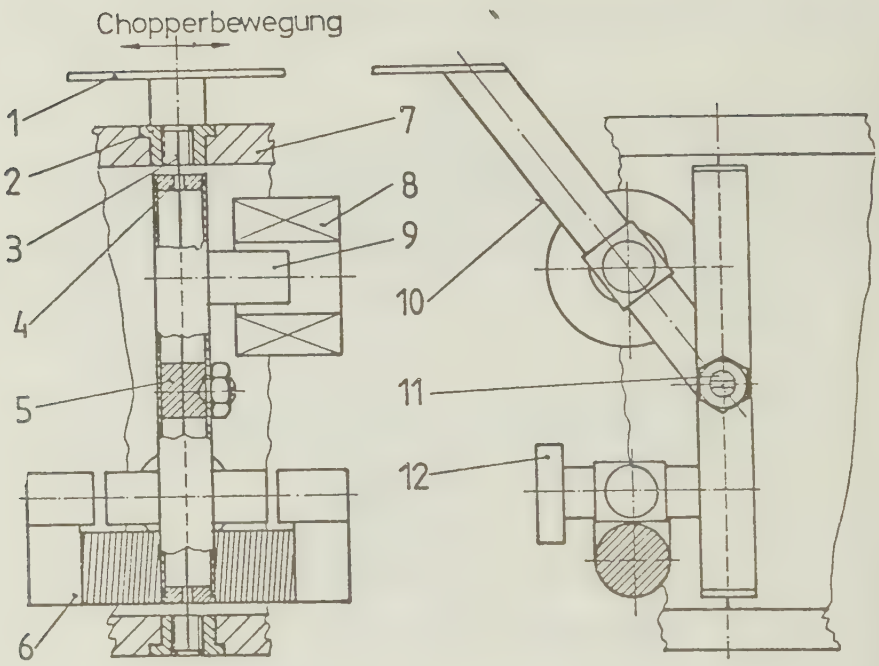
Der bewegliche Teil des Choppers besteht aus einem federnden Tombak-Blech (dieses Material ist sehr elastisch), das an einem Ende am Gehäuse befestigt wird, und dessen anderes Ende das Chopperblatt bildet. In dieses Chopperblatt ist ein Permanentmagnet eingebaut, der durch eine elektromagnetische Spule angetrieben wird. Es muß dafür gesorgt werden, daß die Antriebsfrequenz mit der Resonanzfrequenz des Gesamtchoppers übereinstimmt, damit eine möglichst kleine Leistungsaufnahme stattfindet. Diese Chopperfrequenz muß empirisch bestimmt werden. Sie ist abhängig von dem am Ende befestigten Gewicht, der Breite, der Stärke und der Länge des Schwingteils. Berücksichtigt werden muß, daß sich die Elastizitätskonstante beim Abkühlen ändert, und die Frequenz bei LHe-Temperatur sich leicht erhöht.

Der Vorteil dieses Choppers ist seine Einfachheit, die relativ kleine Einbautiefe und die kleine Leistungsaufnahme. Für Raumfahrtbedingungen ist

er jedoch ungeeignet, da er nur in einer Stellung betrieben werden kann. Darüber hinaus verträgt er auch keine Rütteltests.

3.3.2.2 Torsions-Chopper

Als Fokalebenen-Chopper, der für Raumfahrtbedingungen geeignet ist und in unserer IR-Kamera eingesetzt werden kann, wurde ein Torsions-Chopper entwickelt. Dieser Choppertyp wird im Kap.6.5 im Zusammenhang mit der IR-Kamera detailliert beschrieben. Das Funktionsprinzip wird aus der Abb.16 ersichtlich.



1: Chopperblatt
2: Stellmutter
3: Federdraht
4: Lager
5: Verankerung
6: Antriebsspule
7: Choppergehäuse
8: Referenzspule
9: Permanentmagnet
10: Choppergestänge
11: Befestigungsschraube
12: Ausgleichsgewicht

Abb.16 Prinzipzeichnung eines Torsionschoppers

3.4 Kryoaufbau

Für den Betrieb der einzelner IR-Detektoren und der Kamera sind Kryogene Temperaturen notwendig. Die verwendeten Ge-Detektoren arbeiten bei Temperaturen unter 3 K, die Si-Detektoren unter 10 K. Für Detektormessungen wurden daher zwei Kryostat-Typen und eine Tauchvorrichtung entwickelt.

3.4.1 Kryostataufbau

Die ersten Messungen wurden in einem umgebauten LHe-Badkryostaten des Typs BKL 150 der Firma Leybold-Heraeus durchgeführt. Bei diesem Kryostaten wurde der LHe-Tank-Boden ersetzt, und sowohl der LN_2-Tank-Schild als auch der Kryostatmantel verlängert (Siehe Zeichnung Nr.Kryostat 1 im Anhang). Da die Handhabung wegen der Abmessung und des Gewichts sehr unpraktisch, und der Einbau von Testeinrichtungen sehr schwierig war, wurde ein neuer Kryostat entworfen und gebaut (Siehe Zeichnung Nr.Kryostat 2 im Anhang).

Die Auslegung des Kryostaten war durch folgende Daten bestimmt:

Durchmesser des LHe-Tank-Bodens	182 mm
Standzeit LHe	~ 16 Stunden
Volumen LHe-Tank	4 l
Volumen LN_2-Tank	4 l
Einbauhöhe	250 mm

3.4.2 Testanordnung

Es wurden je nach Verwendung vier Typen von Testanordnungen entwickelt. Zunächst mußten Voruntersuchungen an Detektoren und Elektronik durchgeführt werden, weiter wurden Detektoren genau vermessen, drittens mußten IR-Filter untersucht werden und zuletzt wurde die gesamte Kamera getestet. Außerdem waren Tests für mechanische Komponenten (Chopper), Thermaltests und Rütteltests im Kalten nötig.

3.4.2.1 Tauchvorrichtung für schnelle Voruntersuchungen an kalter Elektronik und IR-Detektoren

Die Grundidee für die Entwicklung und den Bau der folgenden Vorrichtung war die Forderung nach schneller Voruntersuchung und Vorselektierung der einzelnen Elektronikkomponenten (Ladewiderstand, Detektor, OP). Dies geschieht durch direktes Eintauchen eines über ein Rohr evakuierten Meßkopfes. Der Meßkopf besteht aus Gründen der besseren Wärmeleitung aus Kupfer. Das umhüllende Rohr aus V2A-Material.
Der Vorteil einer solchen Anordnung ist gegenüber einer Messanordnung im Kryostaten die sehr kurze Vorbereitungszeit. Langes Evakuieren und Vorkühlen entfallen. Einbau, Evakuieren, Abkühlen und Messen können innerhalb einer Stunde durchgeführt werden. Der Nachteil ist, daß man wegen der zu kleinen Abmessungen keinen Chopper einbauen kann. Außerdem entsteht durch das lange Zuleitungsrohr teilweise Mikrophonie.

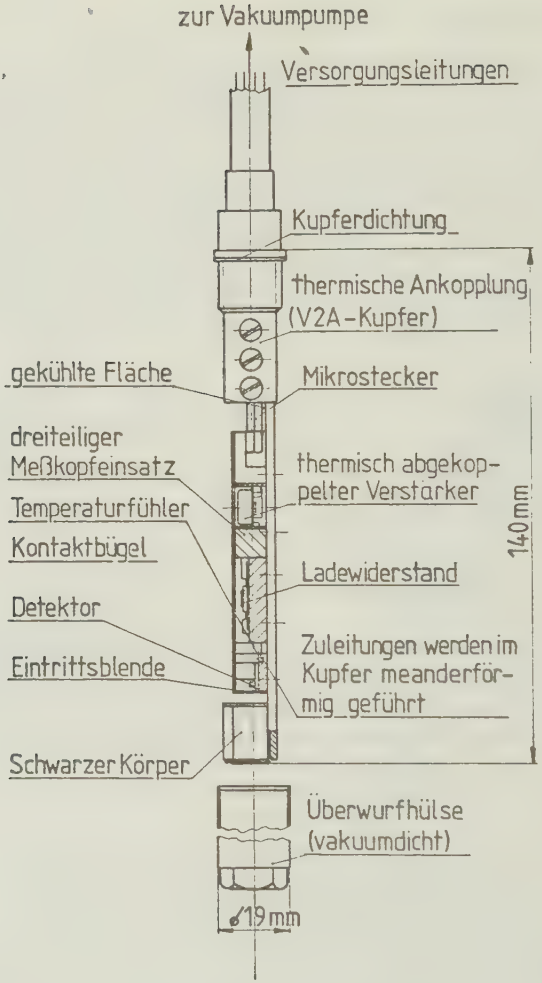


Abb.17 Querschnittszeichnung des Tauchrohrmeßkopfes

Der Aufbau innerhalb des Meßkopfes wurde so gestaltet, daß am Vorderteil ein variabler SK befestigt wurde (sh. Kap. 3.3.1.2).
In entsprechend vorgesehene Stecker wurde dann ein Cu-Schiffchen eingeschoben. Dieses Schiffchen enthält die Elektronik (Detektor, OP, Diode, Ladewiderstand) und kann sowohl im Tauchrohr als auch in einem Kryostaten eingesetzt weden.

3.4.2.2 Meßkopf

Der eigentliche Meßkopf (Schiffchen) besteht aus drei Teilen, die jeweils für sich eine Elektronikkomponente enthalten. Im vorderen Teil befindet sich der Detektor, der auf einem Saphirplättchen über eine Druckplatte sowohl thermisch als auch elektrisch kontaktiert wird. Vor dem Detektor ist eine Blende und gegebenenfalls ein Filter angeordnet. Auf der Unterseite dieses Teils befindet sich eine Temperaturdiode. Der Mittelteil enthält den auf ein Saphirplättchen montierten Widerstand. Das Saphirplättchen ist genauso wie beim Detektor notwendig, um hier eine gute thermische Ankopplung zu gewährleisten und andererseits gut elektrisch zu isolieren. Der dritte Teil enthält den OP (bzw. J-FET oder MOS-FET), wobei im Falle des OPs bzw. J-FETs dafür gesorgt werden muß, daß er möglichst wenig Kontakt zum Gehäuse hat, da er auf einem höheren Temperaturniveau arbeitet (50 - 70 K) als die Umgebung, die sich auf einem Temperaturniveau von 4,2 K befindet. Am OP ist gut thermisch angekoppelt eine Temperaturdiode befestigt, die die Arbeitstemperatur des OPs mißt. Sie kann, falls diese Temperatur sehr weit absinkt, anders gepolt zum Aufheizen des OPs benutzt werden. Alle drei Teile werden, nachdem sie mit einem Abschlußblech zu einer Einheit verschraubt worden sind, auf die Bodenplatte der Tauchvorrichtung angeschraubt und dadurch gut thermisch angekoppelt.

Abb.18 Foto des dreiteiligen Meßkopfes

Da auf Lichtdichtheit geachtet werden muß, werden die Leitungen zwischen den einzelnen Komponenten in Kanälen mäanderförmig geführt. Der OP sitzt dadurch in einem nahezu lichtdicht abgeschlossenen Raum.
Der Vorteil dieses Meßkopfes ist, daß er durch den modularen Aufbau ein schnelles und relativ unproblematisches Austauschen der einzelnen Komponenten ermöglicht. Die Größe dieses Moduls beträgt 70 x 12 x 8 mm^3.

3.4.2.3 Messanordnung für Einsatz in einem Kryostaten

Für die absolute Eichung von IR-Detektoren ist es notwendig,thermisch möglichst stabile Zustände zu schaffen. Man braucht daher eine stabile IR-Quelle und einen mit sehr kleiner Verlustleistung arbeitenden Chopper.
Im folgenden werden zwei Meßanordnungen beschreiben, in denen sowohl Detektoren, als auch Voroptik (Filter, Linse, Konus) vermessen werden können.

3.4.2.3.1 Baffle-System-Anordnung

Die erste Anordnung dient sowohl zur Vermessung von einzelnen Detektoren, Voroptik, Elektronik, als auch zum Testen mehrerer Detektoren parallel (Zeile) oder der gesamten Kamera. Der Aufbau ist so gestaltet, daß sich in einer Einbuchtung im LHe-Tank eine IR-Quelle sowie ein Chopper nebst Baffle-System befinden (s. Abb.19). Am LHe-Tankboden wird dann die eigentliche Detektor- oder Zeilenhalterung montiert. Dabei muß darauf geachtet werden, daß keine Hintergrundstrahlung z.B. vom LN_2-Strahlungsschild zum Detektor gelangen kann. Die eigentliche Kühlung des Detektorgehäuses geschieht über Kühlbänder aus hochreinem Kupfer. Bei dieser Anordnung ist es notwendig, eine Wärmemenge von ca. 40 mW abzuleiten, um den Detektor bei seiner Betriebstemperatur zu halten.

Diese Wärmemenge hat folgende Anteile:

Verlustleistung des Choppers max.	3 mW
Verlustleistung notwendig zum Aufheizen des SK max. bei max. 100 K und einer strahlenden Fläche von 1 mm^2	$5{,}67 \times 10^{-3}$ mW
Verlustleistung notwendig zum OP-Betrieb max. Betriebstemperatur max. 100 K	5 mW
Belastung über Zuleitungen (Manganin Durchm. 0,1 mm, Teflonisolation Durchm. 0,3 mm. 20 cm lang) T 76 K	3 mW
Belastung über Strahlung von LN_2-Schild	max. 30 mW

Die benötigte Kühllitze kann folgendermaßen dimensioniert werden:

Für den Wärmestrom durch einen Festkörper gilt:

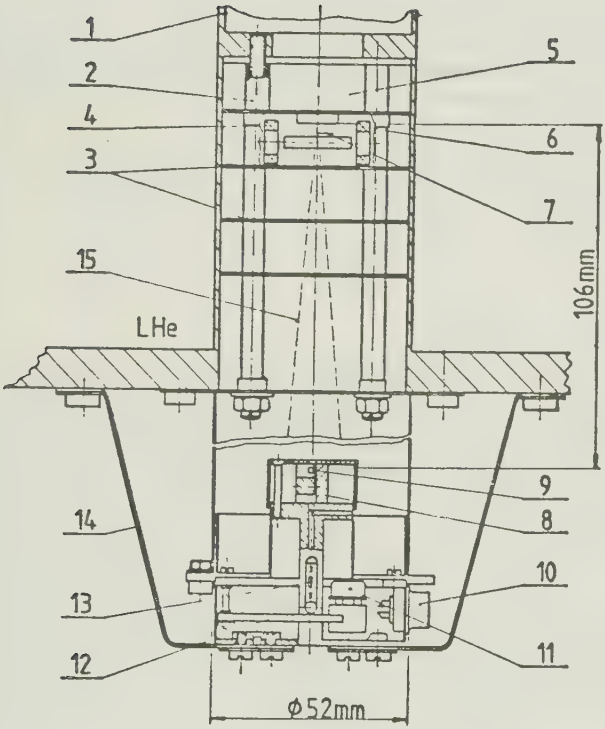
$$(12) \qquad Q = A/L \times \int_{T_1}^{T_2} \lambda^* \times dT \quad [W]$$

A: Querschnittsfläche [cm^2]
L: Länge [cm]
T_1 u. T_2: Temperaturen an den Enden von L [K]
λ^*: Wärmeleitfähigkeit [W/(cm·K)]

Für Kupfer ist

$$\int_{LHe}^{LN_2} \lambda^* \times dT = 686 \ [W/cm] \quad \text{(Elektrolytkupfer)}$$

Bei einem 20 cm langen und 0,5 mm starken Kupferstreifen wäre demnach nur eine Breite von 0,2 mm notwendig, um die anfallende Wärmemenge abzuleiten. Da jedoch alle Wärmeübergangskoeffizienten nur abgeschätzt werden können, und die Abkühlzeit möglichst kurz sein soll, wurde die Kühlbandbreite 25 mm gewählt.



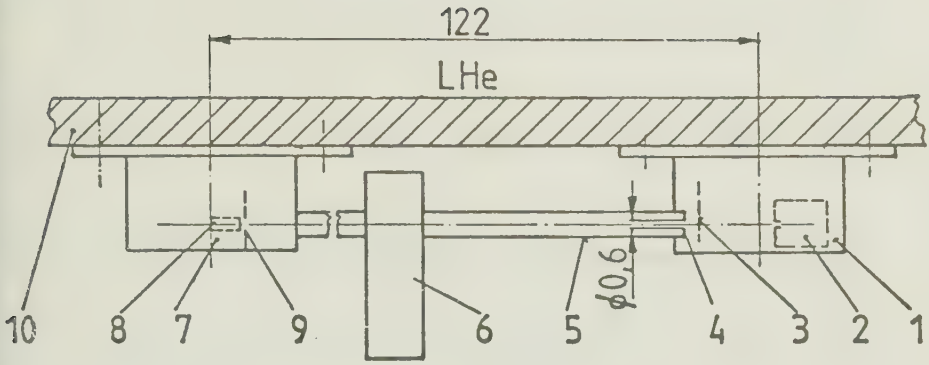
1: Kryostat
2: Cu-Distanzrohre
3: Blenden
4: Antriebsspule
5: Schwarzer Körper
6: Referenzspule
7: Chopperblatt
8: Detektorgehäuse
9: Detektor
10: Cannonstecker
11: Operationsverstärker
12: thermische Abkopplung für OP
13: Ladewiderstand
14: Kühllitze
15: Strahlengang

Abb.19 Baffle-System-Anordnung

Die gesamte Anordnung sieht man in Abb.19. Im oberen Teil befindet sich in einer LHe-Tankeinbuchtung der temperaturgeregelte SK, ein Chopper und mehrere Blenden. Am LHe-Tankboden wird ein Cu-Zylinder befestigt, der im unteren Bereich die eigentliche Halterung für Detektoren bzw. Elektronikkomponenten aufnimmt. Diese Halterung wurde so konzipiert, daß sie einen OP so aufnehmen kann, daß dieser thermisch über ein GFK-Gestänge abgekoppelt werden kann. Die Zuleitungen zum Detektor wurden lichtdicht in Kanälen geführt. Der Detektor selbst befindet sich im ausgefrästen Kanal eines Cu-Würfels, der an die Halterung angedrückt wird.
Zum Vermessen einer ganzen Zeile wird nur der untere Teil zusammen mit einer entsprechenden Halterung ausgetauscht.
Für den Betrieb der Kamera (sh. Kap.7) wird auch der Zylinder entfernt und durch eine andere Halterung ersetzt.

3.4.2.3.2 Doppelbuchsen-Anordnung

Für Messungen, für die eine kürzere Abkühlzeit auf Temperturen von ca. 2 K erforderlich ist, sowie für Filtermessungen, wurde folgende Anordnung entwickelt (Abb.20): Bei dieser Anordnung wurde der V2A-LHe-Tankboden durch einen Cu-Boden ersetzt. Die optische Achse (SK-Detektor) wurde um 90 Grad gedreht. Dabei befindet sich die SK-Quelle mit Chopper in einem, der Detektor mit Elektronik in einem zweiten Gehäuse, wobei der OP heizbar außerhalb der Elektronikbuchse angeordnet ist. Der OP kann auch direkt an den nebenstehenden LN_2-Schild montiert und dadurch bei einer konstanten Temperatur betrieben werden. Die Verbindung zwischen Quelle und Detektor übernimmt ein in der Mitte teilbares Cu-Rohr. In der Mitte kann in einem speziellen Gehäuse das Filtermaterial angeordnet werden. Um die gesamte Anordnung lichtdicht zu machen, werden die einzelnen Komponenten auf Passung gefertigt.



1: Strahlungs-Buchse
2: Schwarzer Körper
3: Chopperblatt
4: Austrittsblende
5: Verbindungsrohr
6: Filterhalterung
7: Detektorbuchse
8: Detektor
9: Aperturblende
10: Kryostatboden

Abb.20 Doppelbuchsen-Anordnung

4.0 Detektormessungen und Untersuchung an einzelnen Komponenten des TIA

Die folgenden Untersuchungen wurden, soweit es sich um quantitative Messungen handelte, mit der im Kap. 3.4.3.1.1 beschriebenen Anordnung durchgeführt. Für die Vorselektion einzelner Komponenten, z.B. der OP's, wurde die in Kap. 3.4.2.1 und 3.4.2.2 beschriebene Tauchvorrichtung verwendet. Die in Kap. 3.4.3.1.2 beschriebene Anordnung wurde zur teilweisen Vermessung einiger Ge:Ga-Detektoren verwendet. Darüberhinaus wurden mit dieser Vorrichtung Untersuchungen an Filtern durchgeführt [Riegger].
In vielen Fällen war das gemessene Rauschen erheblich höher als das theoretische Johnson-Rauschen. Es zeigte sich, daß hierführ meist die Rückkopplungswiderstände (Ladewiderstände) verantwortlich waren. Diese wiesen einen starken temperatur- und spannungsabhängigen inneren Widerstand auf und mußten daher vorselektiert werden. Hierzu mußten die Widerstände als Funktion der Spannung mit Hilfe eines Pikoampermeters im Tauchrohr vermessen werden.

4.1 NEP-Berechnung für eine spezielle Meßanordnung

Für die äquivalente Rauschleistung (Noise Equivalent Power, s. S. 11) gilt

$$(13) \qquad NEP = P_{RMS} \times U_R/U_S \times \Delta f^{-1/2} \qquad [W/\sqrt{Hz}]$$

Gemessen wird U_S und U_R und die SK-Temperatur. P_{RMS} wird durch die geometrischen Gegebenheiten und Detektoreigenschaften bestimmt.

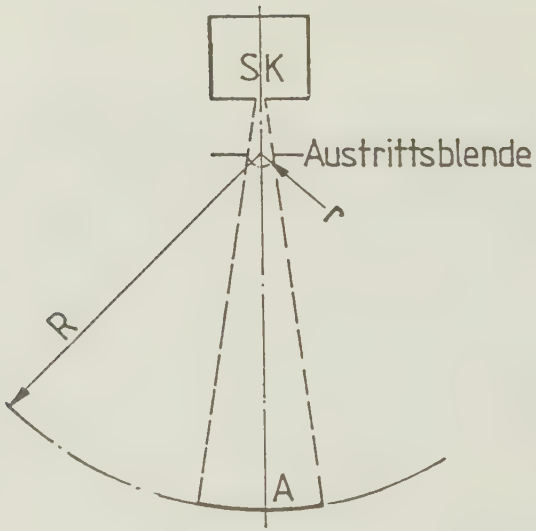


Abb.21 Strahlengang SK-Detektor

r: Radius der Austrittsblende [mm]
R: Abstand Austrittsblende - bestrahlte Detektorfläche [mm]
A: bestrahlte Detektorfläche [mm^2]

Nach Kapitel 3.3 gilt für die abgestrahlte Leistung eines SK (Formel 10)

$$P_{bb} = \sigma \times \varepsilon \times T^4 \times F \quad [W]$$

bzw. für den Strahlungsfluß

(14) $$H_{bb} = \sigma \times \varepsilon \times T^4 \quad [W/cm^2]$$

Da sich der Detektor in einer Entfernung R von der Quelle befindet, wird die am Detektor ankommende Leistung um den Faktor $(r/R)^2$ reduziert (siehe Abb. 21). Am Detektor, bei dem die bestrahlte Fläche A ist, ist die ankommende Leistung

(15) $$P_{RAD} = H_{bb} \times A \times (r/R)^2$$
$$= \sigma \times \varepsilon \times T^4 \times A \times (r/R)^2$$

Wie im Kap. 3.1.1 beschrieben, besitzen die von uns verwendeten IR-Detektoren, da es sich um Photoleiter handelt, eine sogenannte cut-off-Wellenlänge, bis zu der sie eine ankommende Strahlung in ein Signal umsetzen. Von dem angebotenen SK-Spektrum wird nur der Teil bis zu λ_c vearbeitet, wobei die Empfindlichkeit des Detektors über alle Wellenlängen bis zu λ_c auch berücksichtigt werden muß. Das heißt, es muß die Planckkurve mit der spektralen Detektorempfindlichkeit $r(\lambda)$ gefaltet werden.
Der aus dieser Betrachtung resultierende Reduzierfaktor F' ist gegeben durch

(16) $$F' = \frac{\int_0^\infty r(\lambda) \cdot P(\lambda) \cdot d\lambda}{r(\lambda_p) \cdot \int_0^\infty P(\lambda) \cdot d\lambda}$$

$P(\lambda)$: Planckfunktion
$r(\lambda)$: spektrale Empfindlichkeit eines IR-Detektors
$r(\lambda_p)$: Funktionswert bei der Wellenlänge der höchsten Detektorempfindlichkeit [Jaacks]

Bei kurzwelligen Detektoren ($\lambda_c < 30\,\mu m$) und $T_{SK} <$ 150 K kann man schreiben

$$F' = \frac{\int_0^{\lambda_c} P(\lambda)\cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda)\cdot d\lambda} \qquad (17)$$

Durch diese Vereinfachung ist der Fehler unerheblich. In dem o.g. Bereich fällt die kurzwellige Flanke der Planckkurve mit der nachlassenden Detektorempfindlichkeit zusammen. Aus der Tab.4 können einige Reduzierfaktoren für kurzwelligeren Detektoren entnommen werden.

Tab.4

SK Temperatur	F' bei $\lambda c = 16{,}5\ \mu m$	F' bei $\lambda c = 28\ \mu m$
20		
30		$0{,}18 \times 10^{-4}$
40		$0{,}11 \times 10^{-2}$
50	$0{,}233 \times 10^{-4}$	$0{,}79 \times 10^{-2}$
60	$0{,}286 \times 10^{-3}$	$0{,}27 \times 10^{-1}$
70	$0{,}15 \times 10^{-2}$	$0{,}617 \times 10^{-1}$
80	$0{,}497 \times 10^{-2}$	0,11
90	$0{,}122 \times 10^{-1}$	0,69

Die vollständige Tabelle ist aus [Siegel, Howell] bzw. [Preußner] zu entnehmen. Für die langwelligeren Detektoren mit $\lambda_c > 30\ \mu m$ sind die Werte für F' aus [Jaacks] zu entnehmen.
Um mit Lock-In-Technik [Riedinger] modulierte Strahlung mit IR-Detektoren messen zu können, ist ein "gechopptes" Signal notwendig. Da durch die Chopperbewegung, die annähernd sinusförmig ist, der zum Detektor gelangende Strahlungsfluß permanent unterbrochen wird, reduziert sich der zum Detektor gelangende Strahlungsfluß um den Choppermodulationsfaktor F_m(typisch 0,4).

Da die Temperatur des Chopperblattes nahezu LHe-Temperaur annimmt, muß der Effekt, der sich aus einem warmen Chopperblatt ergeben würde, hier nicht berücksichtigt werden.

Für die vom Detektor tatsächlich verarbeitete Leistung P_{RMS} gilt

(18) $$P_{RMS} = H_{bb} \times A \times F' \times F_m \times (r/R)^2$$

$$= \sigma \times \varepsilon \times T^4 \times A \times F' \times F_m \times (r/R)^2$$

Für	SK-Blendenradius	$r = 0{,}25$
	bestrahlte Detektorfläche	$A = 1{,}0\ mm^2$
	Abstand SK-Detektor	$R = 135\ mm$
	Emissivität	$\varepsilon = 1$
	Choppermodulationsfaktor	$F_m = 0{,}4$

Es ergibt sich für P_{RMS}

(19) $$P_{RMS} = \sigma \times \varepsilon \times T^4 \times A \times F' \times F_m \times (r/R)^2$$

$$= 5{,}7 \times 10^{-14} W/mm^2K^4 \times T^4 \times 3{,}42 \times 10^{-6}$$

$$\times T^4 \times A \times F' \times F_m$$

$$= 1{,}95 \times 10^{-19} W/K^4 \times T^4 \times F' \times F_m$$

Somit ergibt sich für die NEP-Berechnung

(20) $$NEP = 1{,}95 \times 10^{-19} \times T^4 \times F' \times F_m \times U_R/U_S \times \Delta f^{-1/2} \quad [W/\sqrt{Hz}]$$

Wie in Kap. 3.1.3 dargestellt, ergibt sich die Dimension $W/\sqrt{Hz}$ aus der Rausch- und Signalmessung, die auf eine Bandbreite von 1 Hz bezogen wird.

Für die Stromempfindlichkeit (sh. Kap. 3.1.3) ergibt sich nach der obigen Betrachtung

(21) $$R^* = U_S/(R_D \times P_{RMS})$$

$$= U_S/(R_D \times 1{,}95 \times 10^{-19} \times T^4 \times F' \times F_m)$$

In den vier nächsten Diagrammen (Abb. 22-25) ist die spektrale Detektorempfindlichkeit der von uns verwendeten IR-Photoleiter-Detektoren dargestellt. Die Diagramme wurden aus [Brunsmann et al.], [Datenblatt Ge:Be Detektor von Battelle], [Bratt, Lewis, Long] entnommen.

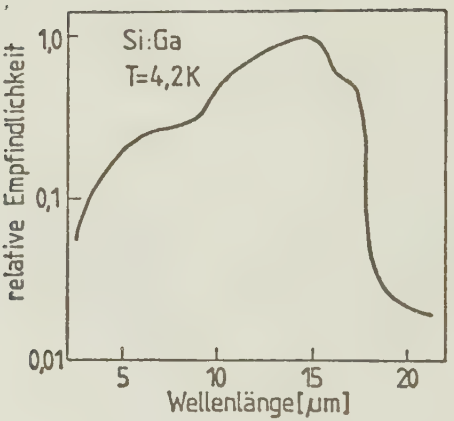


Abb.22 Spektrale Empfindlichkeit eines Si:Ga-Detektors [Brunsmann]

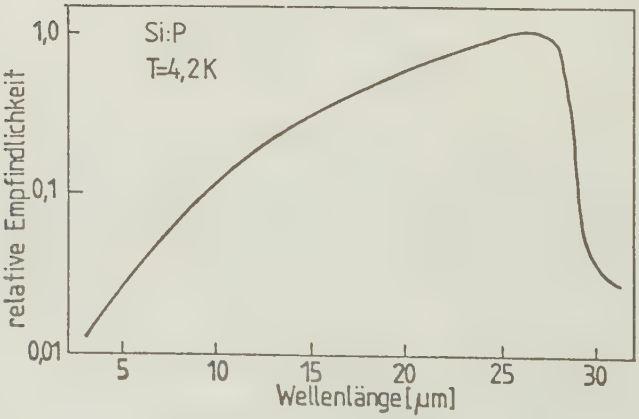


Abb.23 Spektrale Empfindlichkeit eines Si:P-Detektors [Brunsmann]

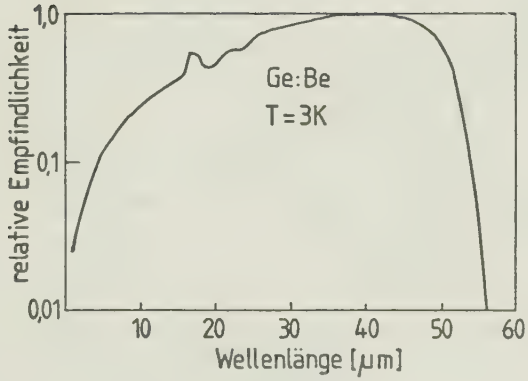


Abb.24 Spektrale Empfindlichkeit eines Ge:Be-Detektors
[Datenblatt Battelle]

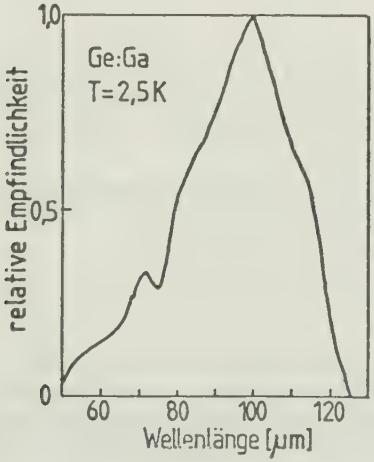


Abb.25 Spektrale Empfindlichkeit eines Ge:Ga-Detektors
gemessen mit einem "Long Wavelength" Filter [Bratt]

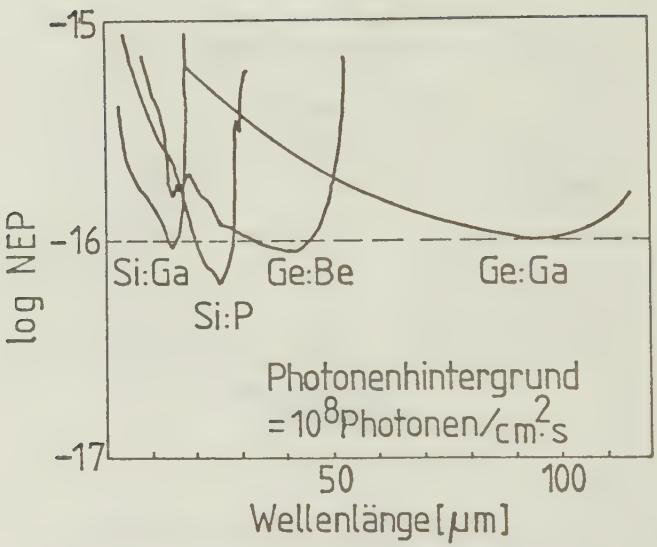


Abb.26 Log NEP als Funktion der Wellenlänge bei einer Modulationsfrequenz von 10 Hz für die Detektoren Si:Ga, Si:P, Ge:Be und Ge:Ga

Aus der Abb.26 ist zu erkennen, daß durch geeignete Wahl der Detektoren ein weites IR-Spektrum überdeckt werden kann.

4.2 IR-Detektormessungen

Im folgenden Abschnitt sind die gemessenen Daten zusammengestellt und ausgewertet, die in den im Kap. 3.4.3.1.1 und 3.4.3.1.2 beschriebenen Meßanordnungen gewonnen wurden. Der IR-Detekor des Typs Si:Ga wurde selbst nicht gemessen, die Daten wurden aus [Jaacks] entnommen, die Messung fand am AIT mit fast identischer Anordnung statt, wie sie im Kap.3.4.2.3 beschrieben ist.

4.2.1 Si:Ga-IR-Detektor Nr. 7/7 6.7 von Battelle

Die Vermessung dieses Detektors ist in [Jaacks] beschrieben. Die Messanordnung entsprach der in Kap. 3.4.2.3 beschriebenen Anordnung.
In Abb.27 sind Rauschen, Signal, NEP, Stromempfindlichkeit vom Si:Ga IR-Detektor 7/7 6.7 von Battelle dargestellt (Battelle Angaben).

Für diesen Detektor ergeben sich folgende Werte:

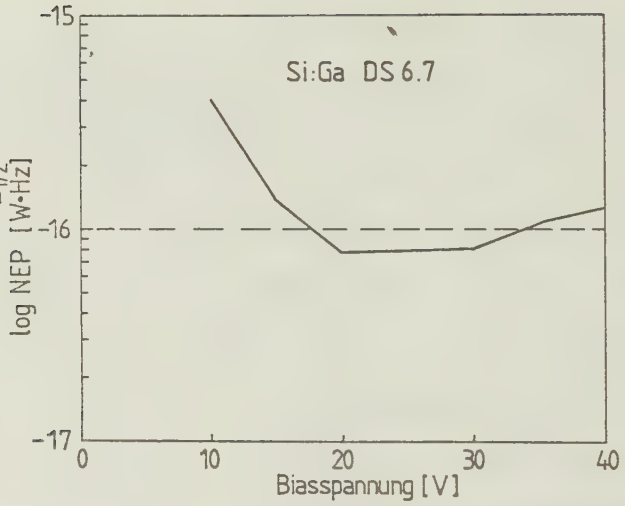
Rauschen	U_R = 3,2 µV
bei einem Ladewiderstand	$R_L = 2 \times 10^{10}$ Ohm
und bei Detektorvorspannung	U_B = 0 V
Der gemessene NEP-Wert	NEP = $2,2 \times 10^{16}$ W/$\sqrt{Hz}$
Stromempfindlichkeit	R^* = 1,36 A/W

Diese Werte wurden bei Berücksichtigung von λc = 16,5 µm gerechnet.

Vom Hersteller (Battelle-Institut) wurden folgende Angaben zu dem o.g. Detektor gemacht:

Detektorbezeichnung	Si:Ga Nr.7/7 6.7
eingestrahlte Leistung (bezogen auf λ_c=15 µm)	$P_{RMS} = 9,9 \times 10^{-15}$ W
Photonenhintergrund	$Q_{Ph} = 1,2 \times 10^8$ Photonen/cm^{2}s
Ladewiderstand	$R_L = 1,8 \times 10^{10}$ Ohm bei 4,2 K
Modulationsfrequenz	f = 10 Hz
Bandbreite	Δ f = 1 Hz
effektive Detektorfläche	$F_D = 0,64 \times 0,6$ mm^2
elektronische Verstärkung	J-FET-Impedanzwandler

die Datenblattangaben sind im Diagramm Abb.27 dargestellt



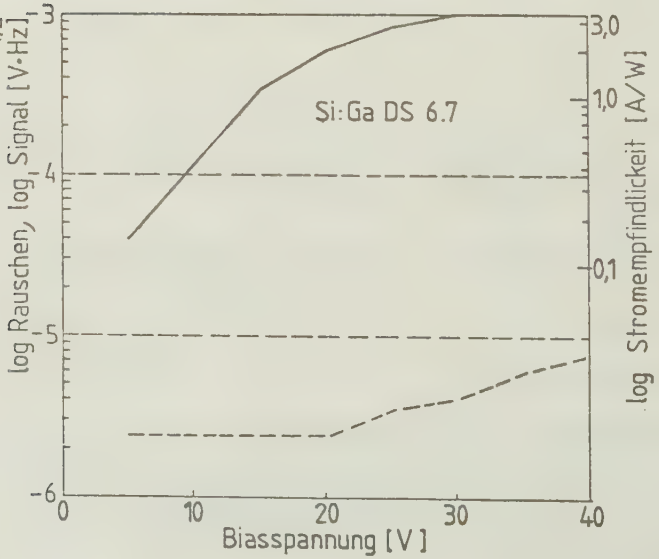


Abb.27 Log der Rauschspannung, Signalspannung, Stromempfindlichkeit und NEP des Si:Ga-Detektors (Battelle 6.7) als Funktion der Detektorvorspannung

4.2.2 Si:P-IR-Detektor NR-DS 13 von Battelle

Dieser Detektor war einer der ersten Si:P-Detektoren der Firma Battelle, der laut Datenblatt einen NEP-Wert unter 10^{-16} W/$\sqrt{Hz}$ erreichte. Die Daten des Detektors sind aus der Abb. 28 zu entnehmen. Die Angaben über die Parameter des Detektors, bei denen er vom Battelle-Institut vermessen wurde, sind in Tab.5 aufgeführt. Sowohl die Herstellerangaben (Battelle) als auch die am AIT gemessenen Daten sind für den o.g. Detektor im Diagramm Abb.28 zusammengestellt.

Tab.5

Detektorbezeichnung	Si:P Detektor DS 13
Eingestrahlte Leistung	$P_{RMS} = 3 \times 10^{-15}$ W
Photonenhintergrund	$Q_{Ph} = 2 \times 10^{8}$ Phot/cm^{2}s
Detektortemperatur	T = 4,2 K
Modulationsfrequenz	f = 10 Hz
Bandbreite	Δf = 1 Hz
Detektorbreite	b = 0,62 mm
Detektorhöhe	h = 0,62 mm
Detektorlänge	l = 2,0 mm
effektive Detektorfläche	F_D = 0,384 mm^2
Grenzwellenlänge	λ c = 28 µm

Die Messung in unserer Meßanordnung wurde mit folgenden Anfangsbedingungen durchgeführt:

Ladewiderstand bei 4,2 K	$R_L = 1,77 \times 10^{10}$ Ohm
bestrahlte Detektorfläche	A = 0,384 mm^2
Modulationsfrequenz	f = 10,6 Hz
Bandbreite	Δf = 1 Hz
Abstand SK-Detektor	R = 106 mm

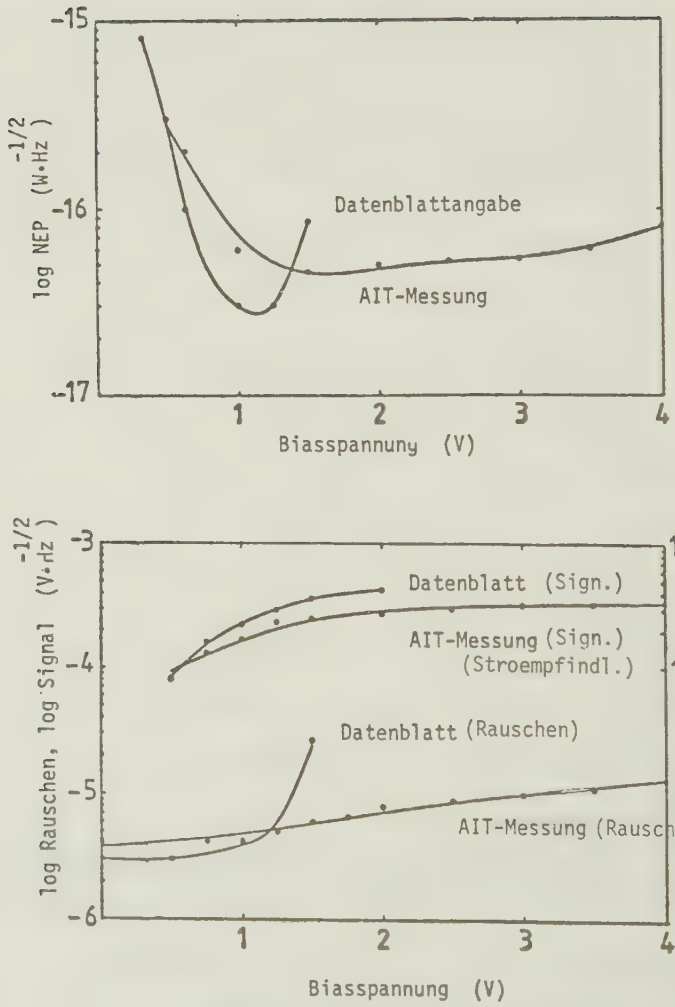


Abb.28 Log der Rauschspannung, Signalspannung, Stromempfindlichkeit und NEP des Si:P Detektors (Battelle) DS-13 als Funktion der Vorspannung.

Durch Variation der SK-Temperatur und dadurch bedingten Änderung der am Detektor ankommenden Strahlungsleistung beobachtet man eine NEP Änderung. Die Abnahme der SK-Temperatur hat eine NEP-Abnahme zur Folge (Siehe Abb.29).

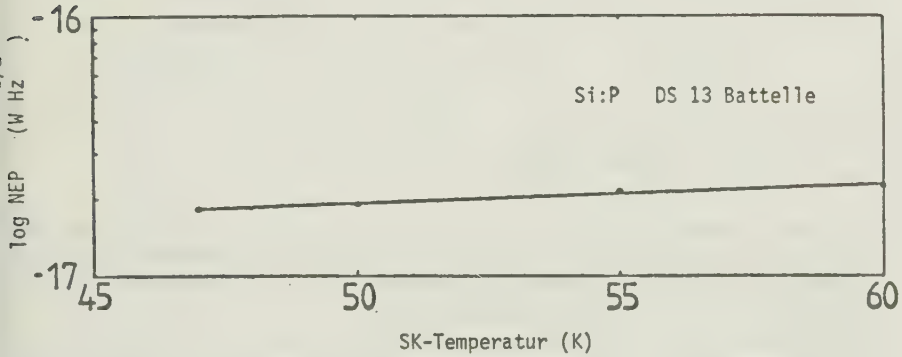


Abb.29 Log NEP als Funktion der SK-Temperatur bei konstanter Detektorvorspannung vom Si:P Detektor DS 13 (Battelle)

Wie bereits im Kap.4.0 erwähnt, zeigen die verwendeten Rückkopplungswiderstände sowohl durch absinkende Widerstandstemperatur als auch durch abnehmende Meßspannung einen Widerstandsanstieg. Durch eine niedrigere Detektorbestrahlung ist die am R_L resultierende Signalspannung ebenfalls niedriger. Dies führt zu höheren Widerstandswerten, die insgesamt ein höheres Signal/Rausch-Verhältnis ergeben. Die daraus resultierenden NEP-Werte sind entsprechend niedriger. Dieser Effekt ist bei allen Detektortypen zu beobachten und muß für die Eichung der Kamera bei der Auslegung der Software berücksichtigt werden.

Um nun die gemessenen NEP-Werte mit den NEP-Werten aus den Datenblättern vergleichen zu können, sollte die am Detektor ankommende und verarbeitete Leistung so eingestellt werden, daß sie der im Hersteller-Datenblatt angegebenen entspricht. Bei unserer Anordnung kann diese Leistung durch Variation der SK-Temperatur eingestellt werden.

Strahlungsleistung Datenblatt	Strahlungsleistung AIT	Temperatur SK
3×10^{-15} W	$2{,}99 \times 10^{-15}$ W	47 K

Bei einer SK-Temperatur von 47 K in unserer Meßanordnung erhalten wir bei einem Si:P-Detektor die gleiche Strahlungsleistung wie Battelle.

	Bester NEP-Wert [W/$\sqrt{Hz}$]	Optimale Det.-Vorsp.	Rauschen bei opt. Det.-Vorsp.
Datenblatt	$4{,}0 \times 10^{-17}$ W/$\sqrt{Hz}$	1,1 V	5 µmV
Messung AIT	$5{,}8 \times 10^{-17}$ W/$\sqrt{Hz}$	2,0 V	8 µmV

Die höhere Detektorvorspannung und auch die höhere Durchbruchsspannung U_B = 4,5 V bei unserer Anordnung resultieren aus dem wesentlich kleineren Hintergrund gegenüber den Messungen beim Hersteller. Im Datenblatt wird der Hintergrund mit 2×10^8 Phot/cm^{2}s angegeben.
Der wesentlich kleinere Hintergrund unserer Anordnung ergibt sich durch nahezu hermetische Kappselung des Detetorraumes gegenüber der Umgebung. Die Kappselung verläuft über Metallbuchsen, die auf einem Temperaturniveau von 4,2 K liegen. Siehe dazu Abb.20.
Das Battelle Institut verwendet eine Meßanordnung, die mit einem "heißen-SK" arbeitet. Dies bedeutet, daß im Außenmantel, im LN_2-Schild und auf LHe-Niveau direkt vor dem Detektor Filter angeordnet sein müssen, die den entsprechenden Teil des Spektrums der einfallenden Photonen abschneiden. Der 300 K-Hintergrund läßt sich jedoch nicht vollständig unterdrücken. Um möglichst genaue Messungen durchführen zu können, müssen die Filtereigenschaften sehr gut bekannt sein, da insgesamt eine Abschwächung der Strahlung um ca. 6 Größenordnungen notwendig ist.

4.2.3 Ge:Be-IR-Detektor NR DS 62 Battelle

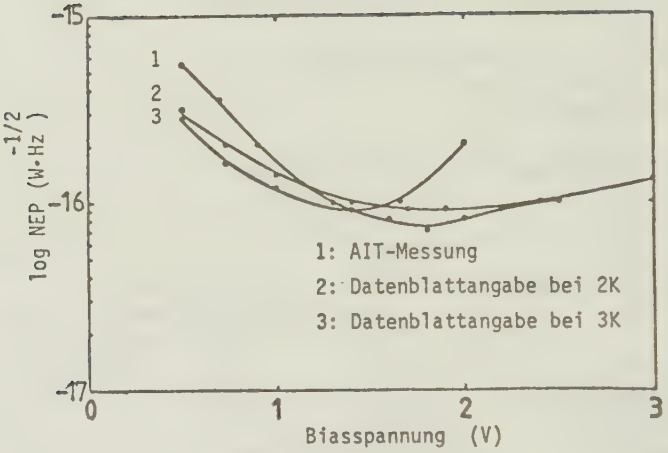
Der einzige Detektortyp für den Wellenlängenbereich bis zu 55 µm, der uns zur Verfügung stand, war der Ge:Be Detektor des Battelle Instituts.
Die Daten des Detektors sind aus der Abb.30 zu entnehmen. Die Detektorparameter, bei denen er vom Battelle-Institut vermessen worden ist, sind in Tab.6 zusammengetragen.

Tab.6

Detektorbezeichnung	Ge:Be DS 62
eingestrahlte Leistung	$P_{RMS} = 1{,}12 \times 10^{-14}$ W
Photonenhintergrund	$Q_{Ph} = 2{,}3 \times 10^{8}$ Photonen/cm^{2}s
Modulationsfrequenz	f = 10 Hz
Bandbreite	Δf = 1 Hz
verwendeter Ladewiderstand	$R_L = 1{,}89 \times 10^{10}$ Ohm bei 4,2 K $= 2{,}08 \times 10^{10}$ Ohm bei 3,0 K $= 2{,}32 \times 10^{10}$ Ohm bei 2,0 K
Detektorbreite	b = 1,1 mm
Detektorhöhe	h = 1,1 mm
Detektorlänge	l = 1,5 mm
Grenzwellenlänge	λ_c = 55 µm

In unserer Meßanordnung wurden folgende Parameter eingestellt:

Ladewiderstand	$R_L = 1 \times 10^{10}$ Ohm bei 300 K
bestrahlte Detektorfläche	A =1,21 mm^2
Modulationsfrequenz	f = 10 Hz
Bandbreite	Δf = 1 Hz
Abstand SK-Detektorblende	R = 138 mm
theoretisches Johnson-Rauschen des Ladewiderstands	v =1,52 µV bei 4,2 K



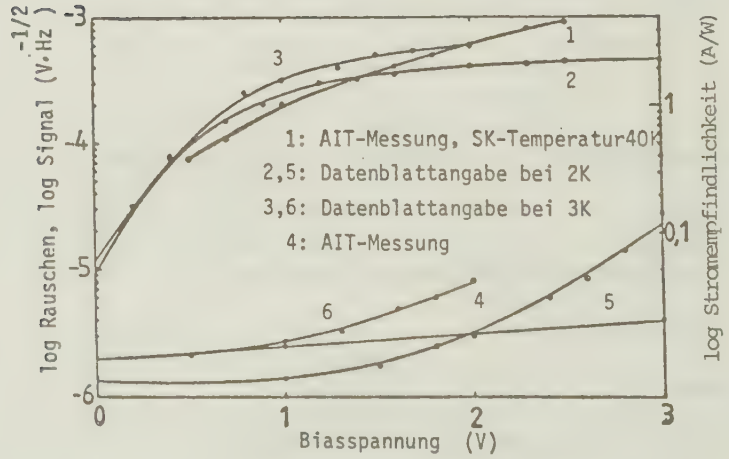


Abb.30 Log der Rauschspannung, Signalspannung, Stromempfindlichkeit und NEP des Ge:Be Detektors (Battelle) DS 62 als Funktion der Detektorvorspannung

Auch in diesem Fall beobachtet man eine Abnahme der NEP-Werte bei sinkender Temperatur. Siehe Abb.31.

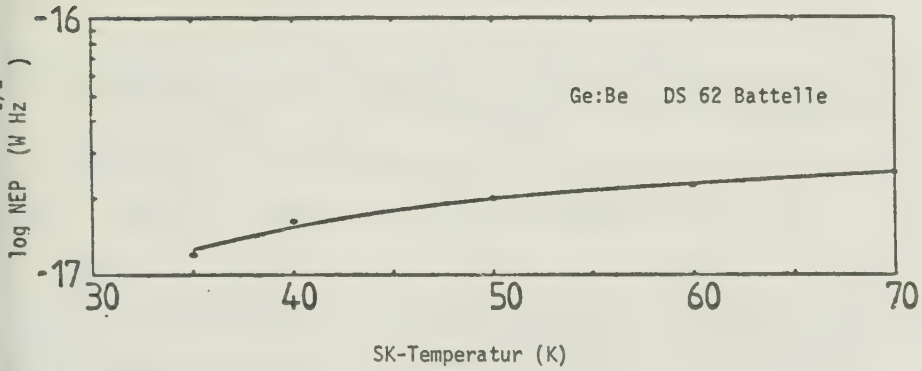


Abb.31 Log NEP als Funktion der SK-Temperatur bei konstanter Detektorvorspannung vom Ge:Be Detektor (Battelle) DS 62

Wichtig bei diesem Detektortyp ist das Erreichen einer Temperatur die bei ca.2.5 K liegt (siehe Abb.30). In unserer Anlage wird dies durch Abpumpen über dem LHe-Bad erreicht.

Um auch an dieser Stelle die NEP des Datenblatts mit der von uns gemessenen vergleichen zu können, sollten die eingestrahlten Leistungen vergleichbar sein.

Strahlungsleistung Datenblatt	Strahlungsleistung AIT	SK-Temperatur
$1{,}12 \times 10^{-14}$ W	$1{,}28 \times 10^{-14}$ W	36 K

Bei einer Temperatur von 36 K erhalten wir etwa die gleiche Strahlungsleistung wie sie das Battelle-Institut im Datenblatt angibt.

NEP-Wert Datenblatt	NEP-Wert AIT	SK-Temperatur
$9{,}5 \times 10^{-17}$ W/$\sqrt{\text{Hz}}$	$7{,}5 \times 10^{-17}$ W/$\sqrt{\text{Hz}}$	36 K

Die angegebene NEP-Werte sind aus dem Diagramm Abb.30 entnommen. Es handelt sich um die niedrigsten Werte.
Die optimale Detektorvorspannung liegt bei 1,5 V, die Durchbruchspannung bei 3,1 V. Die Detektortemperatur lag bei 2,5 K. Da auch bei diesem Detektor kein Hintergrund vorhanden war, fallen auch hier die gemessenen Daten abweichend vom Detektordatenblatt aus. Der NEP-Wert lag aber im Bereich der Datenblattangabe.

4.2.4 Ge:Ga-IR-Detektoren

Von diesem Detektortyp standen uns Detektoren zweier Hersteller zur Verfügung. Neben den Battelle Detektoren wurden auch Detektoren der Fa. SBRC vermessen und miteinander verglichen. Wie bereits bei den theoretischen Betrachtungen erwähnt, stellen Ge:Ga Detektoren von der Temperatur her die höchsten Ansprüche. Es muß dafür gesorgt werden, daß der thermische Kontakt zu dem abgepumpten LHe-Bad möglichst optimal ist. Die Temperatur eines Ge:Ga Detektors darf während einer Messung 2,5 K nicht überschreiten. Für das LHe-Bad bedeutet das eine Temperatur von maximal 2,0 K.
Da die Ge:Ga Detektoren die langwelligste Empfindlichkeitsgrenze besitzen (λ_c= 120 µm), müssen sie besonders gut gegenüber den Hintergrundphotonen abgeschirmmt werden. Bereits ein kleines Photonenleck zur LN_2-Abschirmung des Kryostaten würde eine starke Beeinflussung der Messung bedeuten.

4.2.4.1 Ge:Ga-IR-Detektor Nr. C-319-5 von SBRC

Datenblattangaben der Firma SBRC

Detektorbezeichnung	Ge:Ga C-319-5
eingestrahlte Leistung	$P_{RMS} = 9{,}45 \times 10^{-16}$ W
Photonenhintergrund	$Q_{Ph} = 4 \times 10^{8}$ Photonen/cm^{2}xs
Empfindliche Detektorfläche	A = 2,25 mm^2
Grenzwellenlänge	$\lambda_c = 120$ µm
Ladewiderstand	$R_L = 6 \times 10^{9}$ Ohm
Erreichter NEP-Wert	NEP = 9,2 x 10^{-17} W/$\sqrt{\text{Hz}}$
Stromempfindlichkeit	$R^* = 2{,}1$ A/W
Modulationsfrequenz	f = 10 Hz
Bandbreite	$\Delta f = 1$ Hz
Detektortemperatur	T < 3 K

Bei unserer Meßanordnung waren folgende Parameter eingestellt:

Detektorfläche (Blende)	A = 2,2 mm^2
Abstand SK-Detektorfläche	R = 135 mm
Ladewiderstand (nominal 300K)	$R_L = 1 \times 10^{10}$ Ohm
Modulationsfrequenz	f = 10 Hz
Bandbreite	$\Delta f = 1$ Hz

Um auch hier die NEP-Werte vergleichen zu können, müssen die eingestrahlten Leistungen vergleichbar sein.

eingestrahlte Leistung SBRC	eingestrahlte Leistung AIT	SK-Temperatur
$9{,}45 \times 10^{-16}$ W	$1{,}35 \times 10^{-15}$ W	17 K

Ein Vergleich der SBRC-Angabe mit unserer Messung fällt folgendermaßen aus: (Siehe dazu Diagramm Abb.32)

SBRC-Angabe	AIT-Ergebnis
NEP = $9{,}2 \times 10^{-17}$ W/$\sqrt{\text{Hz}}$	NEP = $6{,}0 \times 10^{-17}$ W/$\sqrt{\text{Hz}}$

Der NEP-Wert im Datenblatt wurde von der Fa. SBRC bei einem Signal- zu Rausch-Verhältnis von 51,4 ermittelt. Bei unserer Messung ereichen wir bereits bei einer SK-Temperatur von 30 K einen NEP-Wert von $8{,}28 \times 10^{-17}$ W/$\sqrt{\text{Hz}}$. Dies entspricht einem Signal- zu Rausch-Verhältnis von 850.

4.2.4.2 Ge:Ga-IR- Detektor DS 125 von Battelle

Die aus dem Datenblatt entnommenen Meßbedingungen waren wie folgt:

Detektorbezeichnung	DS 125
eingestrahlte Leistung	$P_{RMS} = 3{,}5 \times 10^{-15}$ W
Photonenhintergrund	$Q_{Ph} = 1{,}1 \times 10^{8}$ Photonen/cm^{2}xs
Detektorbreite	b = 2,6 mm
Detektorhöhe	h = 2,6 mm
Detektorlänge	l = 3.0 mm
bestrahlte Detektorfläche	A = 2,25 mm^2
Modulationsfrequenz	f = 10 Hz
Bandbreite	Δf = 1 Hz

Die Meßbedingungen unserer Anordnung waren folgende:

Abstand SK-Detektor	R = 98 mm
bestrahlte Detektorfläche	A = 0,78 mm^2
Ladewiderstand(bei 300K)	$R_L = 1 \times 10^{10}$ Ohm
Modulationsfrequenz	f = 10 Hz
Bandbreite	Δf = 1 Hz

Im Diagramm Abb.32 können die detektorspezifischen Daten entnommen werden.Der Vergleich der eingestrahlten Leistungen fällt folgendermaßen aus:

eingestrahlte Leistung Battelle	eingestrahlte Leistung AIT	SK-Temperatur
$3,5 \times 10^{-15}$ W	$3,8 \times 10^{-14}$ W	30 K

Da die Genauigkeit der Temperaturmessung unserer Anordnung unterhalb 30 K stark abnimmt, waren wir bemüht, SK-Temperaturen >30 K einzustellen.
Bei einer SK-Temperatur von 30 K erreichen wir einen NEP-Wert von 1×10^{-17} $W/\sqrt{Hz}$.

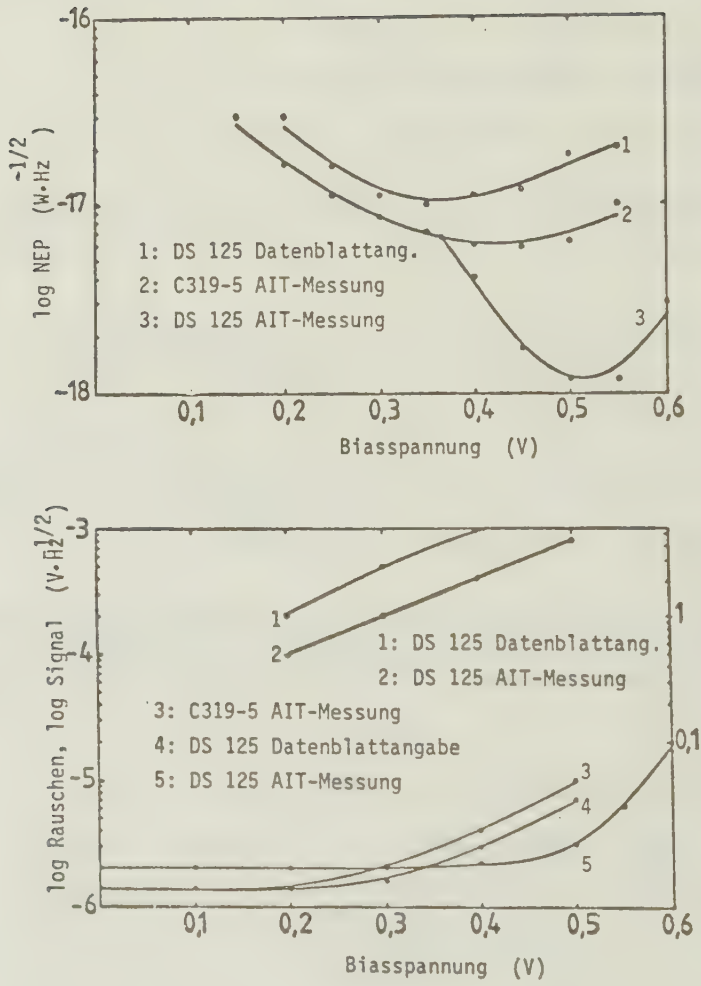


Abb.32 Log der Rauschspannung, Signalspannung, Stromempfindlichkeit und NEP der Ge:Ga Detektoren DS 125 (Battelle) und C-319-5 (SBRC) als Funktion der Detektorvorspannung

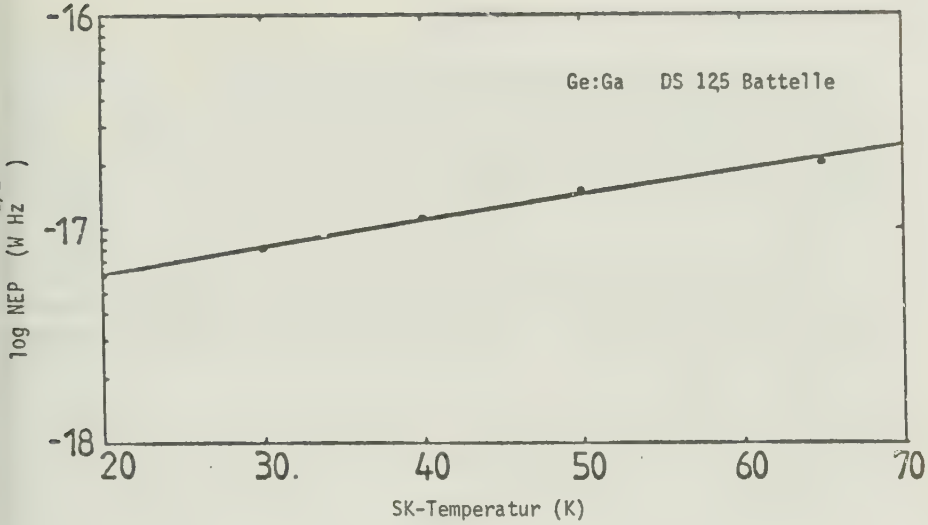


Abb.33 Log NEP als Funktion der SK-Temperatur bei konstanter Detektorvorspannung vom Ge:Ga Detektor DS 125 (Battelle)

4.2.4.2.1 Vergleich der Ge:Ga Detektoren von SBRC und Battelle

Aus den Diagrammen Abb.32 und Abb.33 können die gesamten Daten der beiden Ge:Ga Detektoren entnommen werden. Aus dem Vergleich geht eindeutig hervor, daß der Ge:Ga Detektor DS125 vom Battelle-Institut bessere Werte erreicht als der SBRC Detektor.
Der Vergleich der NEP-Werte beider Ge:Ga Detektoren fällt folgendermaßen aus:

SBRC C-319-5		Battelle DS 125	
Datenblatt	AIT-Messung	Datenblatt	AIT-Messung
$9{,}2 \times 10^{-17}$ W/$\sqrt{Hz}$	6×10^{-17} W/$\sqrt{Hz}$	1.2×10^{-16} W/$\sqrt{Hz}$	1×10^{-17} W/$\sqrt{Hz}$

Auch die Ge:Ga Detektoren zeigen die Abhängigkeit der NEP-Werte von der eingestrahlten Leistung (siehe Diagramm Abb.33).

4.3 Resümee aus allen Detektormessungen

Alle von uns vermessenen Detektortypen Si:Ga, Si:P, Ge:Be, Ge:Ga erreichen, bzw. unterschreiten die NEP-Angaben der Hersteller. Es ist möglich, sie mit der am AIT entwickelten Schaltung zu betreiben (Operationsverstärker LF441). Die Montierung der Detektoren auf einem Saphirplättchen und die thermische und elektrische Kontaktierung über Andruckkontakte hat sich bewährt.
Die thermische Abkopplung des Operationsverstärkers, der sich auf einem Temperatur-Niveau zwischen 60 und 70 K befindet,war zufriedenstellend. Die Leitungen zum Detektor konnten so geführt werden, daß kein störender Hintergrund feststellbar war. Ein höherer Hintergrund würde das Rauschen, die erreichbare Detektor-Vorspannung und dadurch den NEP-Wert verschlechtern.

Aufgrund dieser Detektor-, Montage-, Schaltungs-Voruntersuchungen wurde folgendes Kamerakonzept entwickelt.

5.0 Kamerakonzept

Die Konzeption der IR-Kamera ist im Zusammenhang mit dem Gesamtkonzept des GIRL zu sehen. Das GIRL-Observatorium sollte in einem Wellenlängenbereich von ca. 3 µm bis ca. 300 µm für astronomische und aeronomische Messungen eingesetzt werden, wobei die wesentliche Aufgabe der IR-Kamera in der Flächenbeobachtung ausgedehnter Gebiete bestehen sollte. Man mußte also bei der Konzeption dieser Kamera bei Berücksichtigung der Wellenlänge der einzelnen IR-Detektoren und der Spiegeldaten des GIRL [Lemke] auf möglichst große Packungsdichte der Detektoren hinarbeiten, um später möglichst ein lückenloses IR-Bild zu erhalten. Die IR-Kamera sitzt unmittelbar in der Fokalebene des GIRL-Teleskops, wobei großer Wert auf die Kompaktheit gelegt wurde, um die anderen GIRL-Experimente in ihrem Platz nicht einzuschränken. Da die Kamera aus konstruktiven Gründen an einem längeren Ausleger befestigt ist, spielt das Gewicht und dadurch auch das Trägheitsmoment der Kamera eine große Rolle. Aus diesem Grund wurde das Gewicht der Kamera auf 1,5 Kg begrenzt. Wegen der möglichen Bildrandfehler des Teleskops wurde die Fokalebene der Kamera auf 20 mm x 11,5 mm eingeschränkt.
Ein weiterer Punkt, der bei der Kozeption der IR-Kamera berücksichtigt werden mußte, ist deren elektrische Verlustleistung. Diese Verlustleistung wurde zunächst auf max. 150 mW festgelegt, wobei die Bemühungen dahin laufen sollten, sie weiter zu reduzieren.
Sowohl die wissenschaftliche Zielsetzung, als auch die technologische Realisierbarkeit bei Einhaltung der Kosten haben zu einem Kamerakonzept geführt, das in den nächsten Kapiteln beschrieben wird.

5.1 Wahl der IR-Detektoren für den Wellenlängenbereich 3-120 µm

Im Vergleich zu anderen Detektoren haben Photoleiter im Bereich 3-120 µm die höchste Empfindlichkeit. Jeder Photoleiter hat in Abhängigkeit von seinem Wirtskristall und der Dotierung eine charakteristische spektrale Abhängigkeit.
Der konkrete Verlauf der spektralen Empfindlichkeit (Abb.34) ist dazu geeignet, für jeden Detektortyp ein bestimmtes Spektralband maximal gut beobachtbar zu machen. Die simultane Beobachtung in mehreren Spektralbändern kann dann z.B. zu einer groben Temperaturbestimmung der beobachteten Quelle benutzt werden.

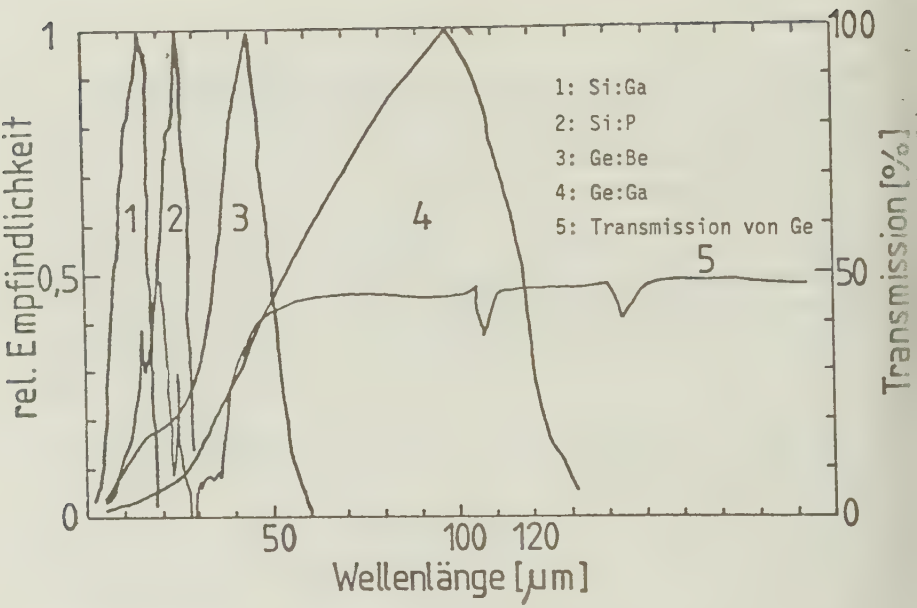


Abb.34 Spektrum von vier IR-Detektortypen (Si:Ga, Si:P, Ge:Be, Ge:Ga)

Die obere Grenzwellenlänge der verfügbaren Photoleiter (Ge:Li, Ge:Ga) liegt bei etwa 120 µm. Diese Grenze kann noch weiter zu größeren Wellenlängen verschoben werden, wenn man einen hohen Druck auf die Detektoren ausübt. Beim derzeitigen Stand der Technik verliert man jedoch etwas an Empfindlichkeit.

Zwar erlauben etwa Bolometer aufgrund ihres physikalischen Prinzips auch den Nachweis von Photonen größerer Wellenlänge, die Empfindlichkeit von Bolometern (z.B.NEP) ist jedoch typisch zwei Größenordnungen schlechter.

Neben den physikalischen Eigenschaften bedeutet die Verfügbarkeit von Detektoren ein wichtiges Auswahlkriterium. Konkret haben wir uns für eine Bestückung der Kamera mit folgenden Detektoren entschieden:

Detektortyp	spektrale Empfindlichkeit	NEP
Si:Ga	3 - 17 µm	$< 1 \times 10^{-16}$ W/$\sqrt{\text{Hz}}$
Si:P	5 - 30 µm	"
Ge:Be	20 - 55 µm	"
Ge:Ga	20 -120 µm	"

Für jeden der o.g. Detektortypen soll in der Kamera eine Zeile entsprechend einem Spektralband aufgebaut werden.

5.2 Cut-On-Filter

Um neben der relativ scharfen Empfindlichkeitsgrenze der Detektoren am langwelligen Ende des Spektrums (Abb.34) auch eine scharfe Begrenzung der Empfindlichkeitskurve an der kurzwelligen Flanke zu erhalten, müssen den Detektoren sogennante "cut-on-Filter" vorgeschaltet werden. Es muß berücksichtigt werden, daß die intrinsischen Niveaus (Niveaus in reinem Kristall) durch kurzwelligere Photonen angeregt werden können. Photonen mit $\lambda < 1{,}4$ µm (Si) bzw. $\lambda < 1{,}7$ µm (Ge), die den Übergang Valenz-Leitungsband anregen, müssen weggefiltert werden. Es wurde folgende Filterauswahl getroffen:

Band	Wellenlänge	Dicke des Filtermaterils	Filtermaterial
I	3 - 17 µm	0,5 mm	Ge-BBAR
II	5 - 30 µm	0,2 mm	Si-AR
III	20 - 55 µm	0,5 mm	Ge-hard Carbon
IV	20 -120 µm	0,5 mm	Ge-hard Carbon

Für Band I und II wurde mit antireflexiv beschichtetes Germanium bzw. Silizium gewählt. Als Antireflexionsschicht kann beim Band I etwa Cd:Te, beim Band II ein sg. 2-layer-System aus Cd:Se-Photoresist verwendet werden. Für Band III und IV ergab mit Kohlenstoff beschichtetes Germanium optimale Resultate. Das Ge-Substrat sorgt dafür, daß Photonen bis zu einer Wellenlänge von 20 µm abgeblockt werden. Es verbleibt jedoch noch der durchgelassene Photonenanteil an der intrinsischen Kante des Germaniums. Dieser Anteil wird durch die Kohhlenstoff-Beschichtung abgeblockt [A.Bubenzer, B.Dischler, G.Brand und P.Koidl]. Um den Kohlenstoff

gleichzeitig als Antireflexionsschicht verwenden zu können, muß die Dicke dieser Schicht $\lambda/4$ betragen.
Die spektrale Bandbreite ist bei der IR-Kamera in den einzelnen Bändern relativ groß. Da jedoch diese Breitbandigkeit z.B. beim Kartieren ausgedehnter Quellen erwünscht ist, wurden keine Schmalbandige Filter vor die Detektoren vorgesetzt. Für Beobachtungen mit höherer spektralen Auflösung sind die drei anderen Experimente innerhalb des GIRL zuständig. Siehe nachfolgende Tabelle.

E2 Photopolarimeter	E3 Ebert-Fastie-Spektrometer	Michelson-Interferometer
$\lambda / \Delta\lambda < 5$ bzw. < 10	$\lambda / \Delta\lambda < 100$	$\lambda / \Delta\lambda = 1000$

5.3 Fokalebene der IR-Kamera und Multi-Spektral-Bildentstehung

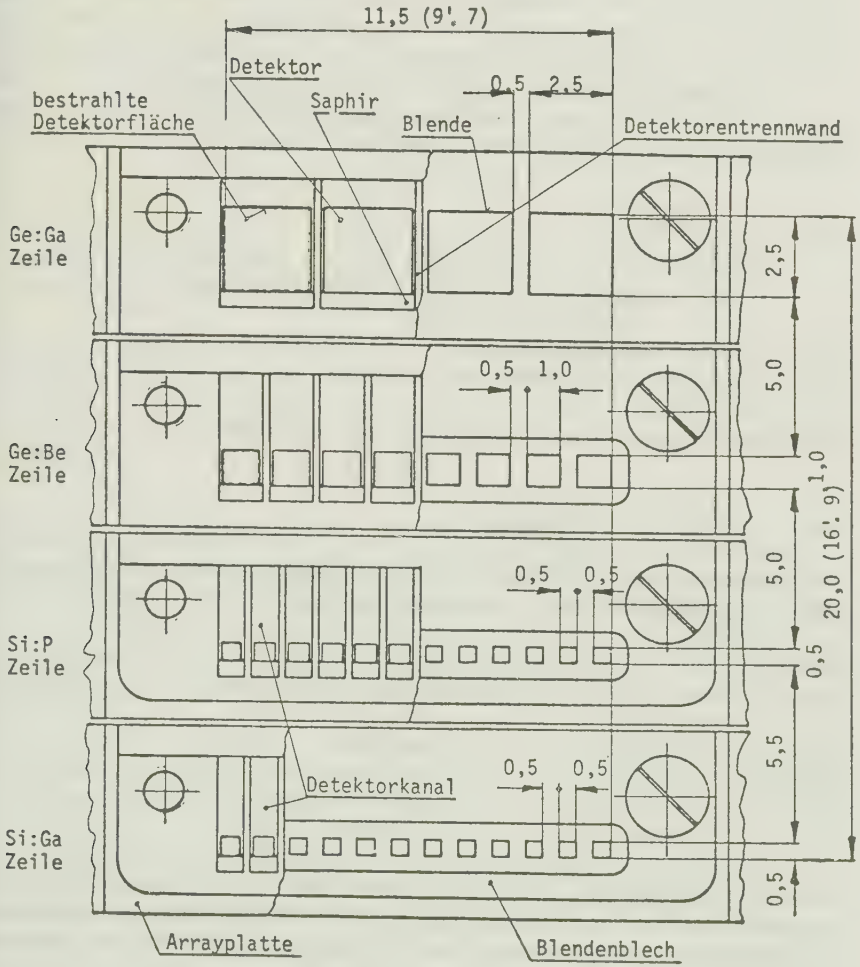


Abb.35 Detektor bzw. Blendenanordnung in der Fokalebene

Die Anordnung der Detektorzeilen (Spektralbänder) in der Fokalebene, die rund 10 Bogensekunden groß ist, ist schematisch in Abb.35 dargestellt [Preußner et al.]. Die Fokalebene wird durch 4 Zeilen gebildet. In der rechten Hälfte des Bildes sind die auf Saphirplättchen montierten Detektoren zu sehen, die linke Seite stellt die darüberliegenden Blenden dar. Dicht unter den Blenden sind die "cut-on"-Filter montiert.
Für den Radius r_B eines zentralen Beugungsscheibchens gilt für ein optisches System nach z.B. [Hecht, Zajac].

(22) $$r_B = 1{,}22 \times \lambda \times f_B/D'$$

r_B = Radius eines zentralen Beugungsscheibchens
λ = Wellenlänge des Lichtes
f_B = Spiegelbrennweite
D' = Spiegeldurchmesser

Beim GIRL-Teleskop-Spiegelsystem ist die Oeffnungszahl

(23) $$f_B/D' = 10{,}67 \quad \text{[Lemke]}$$

Somit ergeben sich für die Beugungsscheibchendurchmesser der einzelnen Bänder, gerechnet für die maximale Wellenlänge, folgende Werte:

Band	Wellenlänge	Beugungsscheibchendurchmesser
I	17 µm	0,44 mm
II	30 µm	0,78 mm
III	55 µm	1,43 mm
IV	120 µm	3,12 mm

Es erschien günstig, die Blendengröße und den Blendenabstand als ganzzahliges Vielfaches einer festen Länge für alle Detektoren zu wählen, da dadurch auf eine einfache Weise ein Vergleich zwischen den einzelnen Spektralbändern möglich ist.
Diese Überlegungen sind deshalb wichtig, weil entsprechende Berechnungen in einem ON-Bord-Mikrokomputer in Echtzeit durchgeführt werden sollen.

Konkret wurden folgende Blendengrößen gewählt:

Band	Blendengröße
I	0,5 mm x 0,5 mm (25" x 25")
II	0,5 mm x 0,5 mm (25" x 25")
III	1,0 mm x 1,0 mm (50" x 50")
IV	2,5 mm x 2,5 mm (2'.1x2'.1)

Das Gesichtsfeld der Kamera ist 11,5 mm x 20 mm groß (sh. Abb.35), entsprechend 9'.7 x 16'.9.

Der Abstand zwischen den Blenden des Bandes I und II beträgt 5,5 mm, zwischen Band II und III sowie zwischen Band III und IV jeweils 5,0 mm. Insgesamt sind in der Fokalebene 36 Detektoren angeordnet, für Band I und II je 12 Detektoren, für Band III 8 Detektoren und für Band IV 4 Detektoren.

Um an den Detektoren modulierte Signale erhalten zu können, muß die ankommende Strahlung "zerhackt" werden. Zu diesem Zweck befindet sich unmittelbar vor der Fokalebene ein Torsionschopper mit kaltem Chopperblatt, der für Modulationsfrequenzen zwischen 1 - 30 Hz ausgelegt ist. Das mit dieser Methode erreichte Absolutchopping bedeutet gegenüber dem schwingenden Sekundär-Spiegel des GIRL-Teleskops, der ein sogenanntes "sky-chopping" [Lemke, Proetel], [Krabe et al.] bewirkt, einen zusätzlichen

Freiheitsgrad. Der Vorteil des Absolutchoppings kommt vor allem bei Beobachtungen ausgedehnter Quellen zur Geltung, während bei Punktquellen eher ein Sky-Chopping günstiger ist.

Zur Erzeugung eines lückenlosen flächendeckenden Bildes in vier Spektralbändern sind systematische Schwenkmanöver des gesamten Teleskops notwendig. Diese Bewegungen werden mit Hilfe des auf dem Space Shuttle montierten IPS (Instrument Pointing Systems) durchgeführt. IPS stellt die eigentliche Aufhängung des GIRL's dar. Diese Manöver werden vom GIRL-Rechner gesteuert. Das gesamte Teleskop und dadurch die Fokalebene der Kamera kann z.B schrittweise um eine Einheitslänge d'=0,5 mm zunächst in X-Richtung versetzt werden. Nach n-Schritten kann dann um ld'=0,5 mm in Y-Richtung und später wieder schrittweise um ld' in X-Richtung verschoben werden. Die nächste Versetzung in Y-Richtung kann dann um die gesamte Kamerabreite geschehen also um 23d' bzw. 11,5 mm. Anschließend wiederholt sich dieser Vorgang (s. Abb.36).

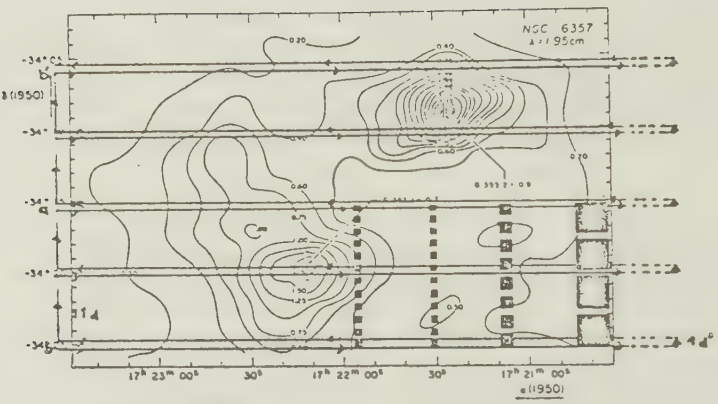


Abb.36 Prinzip der Abrasterung ausgedehnter Quellen mit der Infrarot-Kamera am Beispiel von NGC 6357 [Preußner, Grewing]

Die Zeitabstände zwischen den einzelnen Schritten hängen von der Intensität der an der Kamera ankommenden Strahlung ab und werden auch vom Experiment-Rechner gesteuert. Als Kriterium wird hier ein ausreichendes Signal-Rausch- Verhältnis genommen. Aus diesen so entstandenen 4-fachen IR-Bildern kann z.B. die Temperaturstruktur einer Quelle errechnet werden [Lemke et al.].

6.0 Aufbau des gekühlten Teils der IR-Kamera

Es wurde versucht, ein modulares Konzept beim Aufbau der IR-Kamera zu erreichen. Da es sich bei den einzelnen Kamerakomponenten um hochempfindliche und wertvolle Bauelemente (Detektoren, Ladewiderstände, Operationsverstärker, Filter) handelt, sollte es möglich sein, sie gegebenenfalls ohne große Anstrengung auszuwechseln, wobei die anderen Komponenten durch diesen Wechsel nicht beeinträchtigt werden sollten. Da ein wesentlicher Teil der Kamera Halbleiterelemente sind, deren technologische Entwicklung ständig fortschreitet, sollte es auch möglich sein, überholte Bauelemente auf den neusten Stand der Technik zu bringen, ohne das übrige Konzept zu verändern. Die weiteren Randbedingungen, die sich zum Teil aus den vorhergehenden Kapitel ergeben, sollen an dieser Stelle nochmals kurz zusammengefaßt dargestellt werden.

Um Detektoren für den Spektralbereich von 3 µm bis 120 µm mit einer NEP $< 1 \times 10^{-16}$ $W/\sqrt{Hz}$ betreiben zu können, ist es notwendig, sie auf Temperaturen < 3 K zu kühlen. Der Betrieb dieser Detektoren stellt hohe Anforderungen an den Vorverstärker, den Ladewiderstand und die Verbindungsleitungen. Diese Komponenten müssen aus Rauschgründen in der Kamera untergebracht werden. Um das Johnson-Rauschen möglichst klein zu halten, müssen auch die Ladewiderstände auf eine Temperatur < 3 K abgekühlt werden. Die Operationsverstärker jedoch werden bei einer Temperatur von 50-80 K betrieben [Jaacks, Mühlheim, Preußner], da sie bei niedrigeren Temperaturen nicht funktionieren. Die Führung der Signal-und Versorgunsleitungen zwischen den beiden Temperaturniveaus muß möglichst lichtdicht erfolgen, und es darf kaum Wärme fließen.
Die Wärmemenge, die notwendig ist, um die Vorverstärker auf einem Temperaturniveau von 50-80 K halten zu können, soll wenn möglich durch den Betrieb der Vorverstärker selbst entstehen. Der gesamte Vorverstärkerblock mit relativ hoher Wärmekapazität muß an die gekühlte Kamerastruktur thermisch so angekoppelt werden, daß die durch Kühlung abgeführte Wärmemenge ein wenig höher ist als die Wärmemenge, die durch den Vorverstärkerbetrieb entsteht. Dabei darf die so abgeführte Wärme auf keinen Fall den Teil der Kamera erreichen, an dem die Ladewiderstände bzw. die Detektoren befestigt sind, und der durch separate Kühlung auf eine Temperatur < 3 K gekühlt wird. Die Kühlung des Vorverstärkerblocks muß über einen separat gekühlten Teil der Kamera verlaufen. Der gesamte Vorverstärkerblock kühlt wegen der relativ hohen Wärmekapazität langsam ab. Nach mehreren Stunden, wenn eine Temperatur von ca. 55 K unterschritten ist, muß durch zusätzliche Heizer Wärme zugeführt werden, bis wieder eine Temperatur von ca. 70 K ereicht ist. Damit die Detektoren durch Wärmestrahlung der eigenen Kamera nicht gestört werden, muß bei der Kabelführung zwischen Vorverstärker und Detektoren und auch zwischen Vorverstärker und Außenraum auf extreme Lichtdichtheit geachtet werden.

Wie in Kap. 5.3 erwähnt, befindet sich dicht über der Fokalebene das Blatt eines Torsions-Choppers. Da es sich um ein bewegtes Teil handelt, werden an den Chopper besondere Anforderungen gestellt. Um einerseits Energiereserven des GIRL nicht übermäßig zu belasten, und andererseits durch die Verlustwärme eine Aufheizung und dadurch Hintergrund-Strahlung-Erzeugung zu vermeiden, muß die Leistungsaufnahme des Choppers möglichst klein gehalten werden (< 1mW). Da sich das Chopperablatt direkt vor den Detektoren befindet, muß hier auf ausreichende Kühlung geachtet werden, da sonst ein unerwünschter Photonenhintergrund entstehen würde. Besondere Anforderungen werden auch an die mechanische Stabilität des Choppers bezüglich Erschütterungen (Rütteltests) gestellt.
Für eine interne Eichung der Detektoren muß eine Eichquelle vorgesehen werden, die möglichst schnell und präzise arbeitet.
Die o.g. Betrachtungen haben zu folgendem Kameraaufbau geführt, Abb.37.

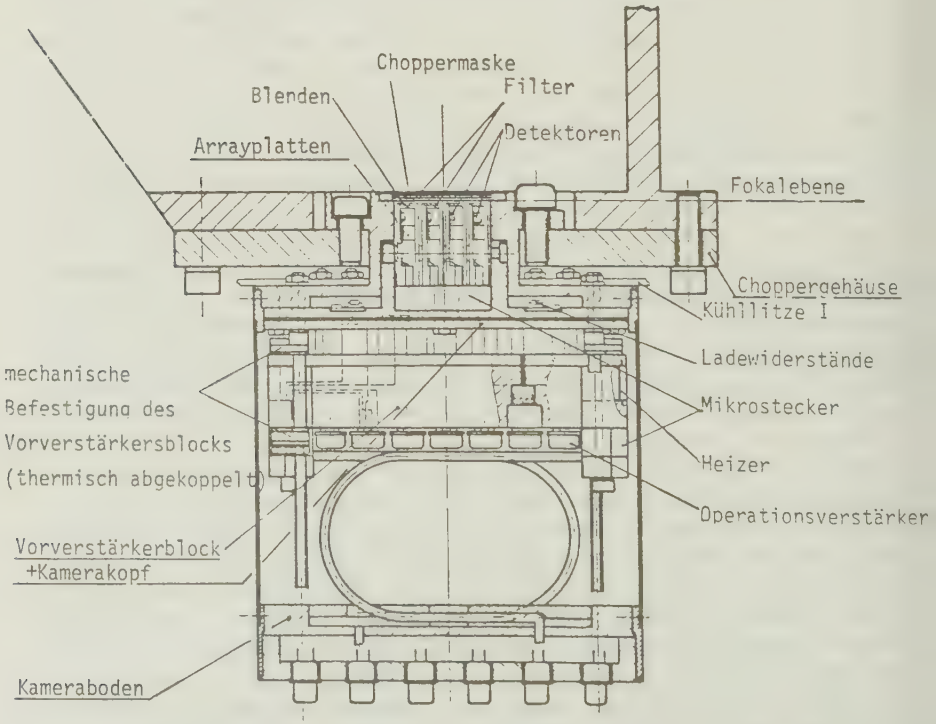


Abb.37 Querschnittszeichnung der IR-Kamera [Mühlheim, Preußner]

Die IR-Kamera besteht aus folgenden fünf Montagegruppen, in die sie leicht zerlegt werden kann:

Arrayplatten (4 Stück)
Kamerakopf mit Vorverstärkerblock
Kameraboden mit Steckern
Kameragehäuse
Choppergehäuse mit Gestänge und Antrieb

Zum Eichen der Kamera ist außerdem eine Eichquelle vorgesehen, die sich außerhalb der Kamera befindet.

Die IR-Kamera wurde für folgende Daten spezifiziert (siehe Tab.7):

Tab.7 Einige Kamera-Daten

	BAND 1	BAND 2	BAND 3	BAND 4
1)	Si:Ga	Si:P	Ge:Be	Ge:Ga
2)	3-17 µm	5-30 µm	20-55 µm	20-120 µm
3)	25.3"	25.3"	50.6"	2.1'
4)	0,42 mm bei 17 µm	0,73 mm bei 29,5 µm	1,36 mm bei 55 µm	2,97 mm bei 120 µm
5)	0,5 mm	0,5 mm	1,0 mm	2,5 mm
6)	$<1x10^{-16}$	$<1x10^{-16}$	$<1x10^{-16}$	$<1x10^{-16}$
7)	$8x10^{-15}$ W $5x10^{5}$ Ph/s	$6x10^{-15}$ W $8x10^{5}$ Ph/s	$8x10^{-15}$ W $1,5x10^{6}$ Ph/s	$6x10^{-14}$ W $2x10^{7}$ Ph/s
8)	$2,5x10^{-18}$	$2,5x10^{-18}$	$1x10^{-19}$	$1,6x10^{-20}$
9)	$3,4x10^{-12}$	$3,4x10^{-12}$	$8,6x10^{-13}$	$1,4x10^{-13}$

1) Detektormaterial
2) Wellenlängenbereich
3) Gesichtsfeld
4) Durchmesser des Beugungsscheibchens
5) Blendengröße (Seitenlänge)
6) NEP des Detektorkreises bei reduziertem Hintergrund [$W/\sqrt{Hz}$]
7) vom Detektor nachweisbarer Zodikallichthintergrund
8) minimaler in 10 s (S/R=3) nachweisbarer Fluß einer Punktquelle [W/cm^2]
9) minimaler in 10 s (S/R=3) nachweisbarer Fluß einer ausgedehnten Quelle [W/cm^2]

6.1 Arrayplatten

Die Anordnung der Detektoren eines Typs in einer Arrayplatte hat mehrere Vorteile. Eine Arrayplatte bildet ein Spektralband der Kamera und kann einfach durch Stecken montiert bzw. ausgetauscht werden. In dieser separaten Einheit können dann leicht sowohl die Detektoren als auch die Filter eingebaut werden. Eine Arrayplatte besteht aus folgenden Teilen:

Arrayplatte mit Blendenblech (Zeichnung Nr. E1-001-30 bis 33)

Klemmkontakt (Bügel, Kontakte, Mikrostecker, Anschlußleitungen)

Detektoren (auf Saphir montiert) Abb.38

Filter

Der Aufbau der Arrayplatten wurde so gestaltet, daß das optische und elektrische Übersprechen zwischen Nachbardetektoren weitgehend verhindert wird. Aus diesem Grund werden in die Arraygrundplatte Kanäle eingefräst, in die dann auf Saphir montierte Detektoren eingelassen werden. Die Breite der Kanälchen richtet sich nach der Breite der Saphirplättchen bzw. nach dem Detektortyp (Tab.5).
Der Kanalabstand untereinander beträgt bei allen Arrayplatten 0,2 mm. Bei diesem Abstand stößt man an die Grenzen der feinmechanischen Fertigung für das verwendete Material Kupfer.
Als mechanische Befestigung der auf Saphirplättchen montierten Detektoren dient eine Abgriffeinheit (Abb.39), die gleichzeitig sowohl den elektrischen als auch den thermischen Kontakt herstellt. Zu diesem Zweck wird ein für alle Kanälchen einer Zeile gemeinsamer V2A-Bügel verwendet, der einzelne Abgriffkrallen enthält.

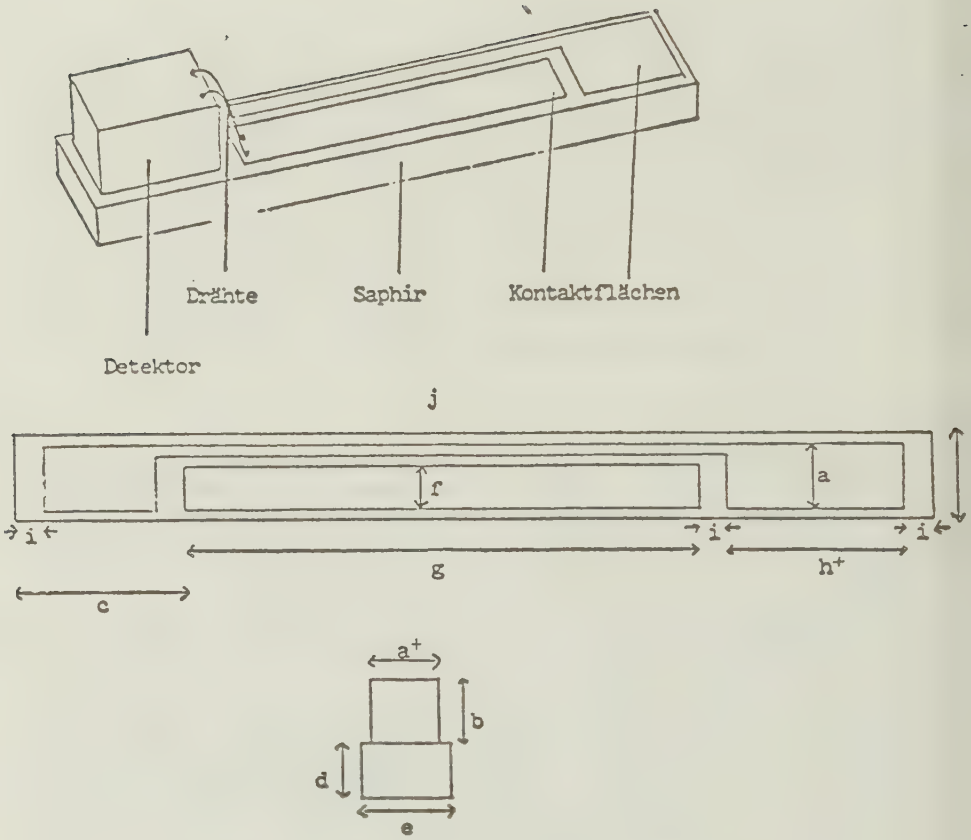


Abb.38 Montierung eines IR-Detektors auf einem Saphirplättchen

Tab.8

	a^+	b	c	d	e	f	g	h^+	i	j
Si:Ga	0.6	0.6	2.0	0.5	0.8	0.4	4.0	1.5	0.2	8.0
Si:P	0.6	0.6	2.0	0.5	0.8	0.4	4.0	1.5	0.2	8.0
Ge:Be	1.1	1.1	2.0	0.5	1.3	0.9	4.0	1.5	0.2	8.0
Ge:Ga	2.6	2.6	3.0	0.5	2.8	2.4	3.0	1.5	0.2	8.0

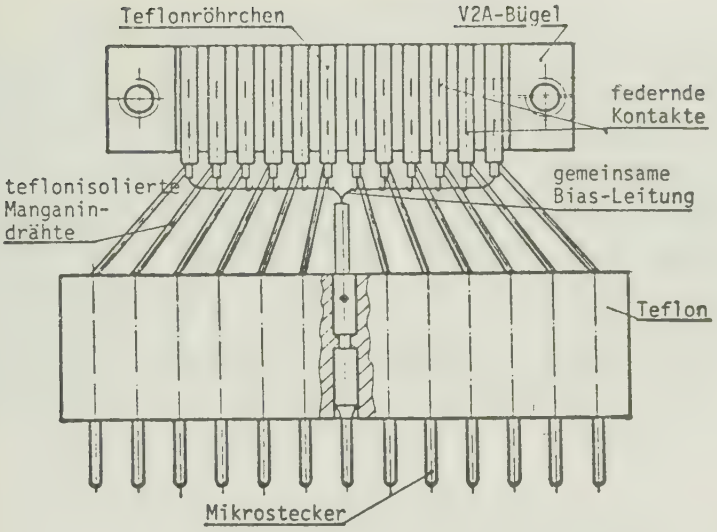


Abb.39 Abriffeinheit einer Arrayzeile

Die Abgriffkrallen der Abgriffseinheit müssen neben dem elektrischen und thermischen Kontakt auch dafür sorgen, daß die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Materialien (Teflon, Cu, Saphir, V2A) einerseits nicht zu Verspannungen, andererseits nicht zum Lockern der Saphirplättchen führen. Es müssen Unterschiede von bis zu 0.02 mm ausgeglichen werden. Die Abgriffkrallen müssen deshalb als kleine federnde Elemente ausgebildet werden. Als Material wurde wegen seiner Elastizität Tombackblech verwendet und in schmale Streifen (max. 0.35 mm) geschnitten. Diese Streifen werden im Teflonteil so angeordnet, daß sie zwei Kämme bilden. Um Leitungen sparen zu können, werden die Biasleitungen (hintere Abgriffläche auf dem Saphir) bei einer Arrayplatte zusammengefaßt und nur als eine Leitung weitergeführt (siehe Abb.39). Die Signalleitungen (vordere Abgriffläche auf dem Saphir) führen einzeln zu einem Mikrostecker, wobei der mittlere Pin für die Biasspannung reserviert ist. Als Verbindungsleitungen zwischen Kralle und Pin dient ein 0,1 mm starker teflonisolierter Manganindraht mit sehr geringen Wärmeleitung.
Bei Si:Ga- und Si:P-Arrayplatten werden sämtliche Pins des Arraysteckers belegt, bei den mit Ge:Be und Ge:Ga Detektoren bestückten Arrayplatten sind es entsprechend der Detektorzahl weniger. Die für das Abblocken optischer (kurzwelliger) Photonen notwendigen Filter werden im vorderen Teil der Arrayplatte dicht unter der Blende montiert.

Arrayplatte dicht unter der Blende montiert.
Das vergütete Si- bzw. Ge-Material wird in die Kanäle vor die Detektoren lichtdicht eingeklebt. Auf diese Weise wird verhindert, daß es durch Mehrfachreflexionen innerhalb des Filtermaterials zum Übersprechen benachbarter Detektoren kommen kann. Die quadratischen Blendenöffnungen vor den Filtern erfordern insbesonders wegen ihrer hohen Toleranzen einen hohen Fertigungsaufwand. Sowohl die Öffnungen als auch deren Abstand müssen auf wenige Hundertstel genau gestanzt werden. Eine größere Abweichung dieser Werte würde bei der Bildkonstruktion zu zusätzlichen Fehlern führen, wenn Signale verschiedener Detektoren zur Aufintegration des gleichen Bildelementes benutzt werden. Der Zeilenaufbau ist aus der Zeichnung Nr. E1-001-30 zu erkennen. Das Blendenblech enthält also die Aperturblendenöffnungen und schließt gleichzeitig den Detektorraum so ab, daß nur Photonen über die Blendenöffnung zum Detektor gelangen können. In Abb.40 ist die Montierung des Detektors und des Filter in einem Detektorarray dargestellt.

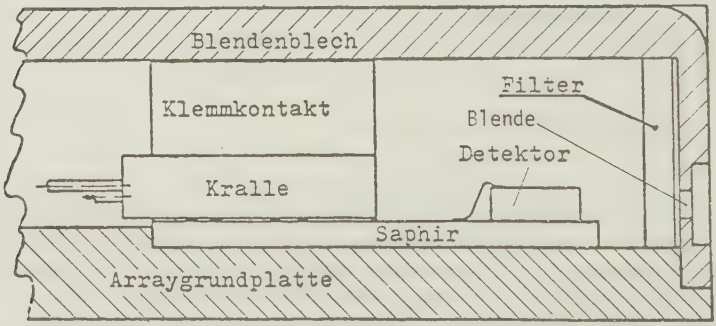


Abb.40 Arrayplatte im Schnitt

Vorteile dieser Montierung sind:

a. gute optische Trennung zwischen den einzelnen Kanälchen
b. gute mechanische Stabilität
c. guter Schutz der Detektoren gegenüber mechanischer Beschädigung oder Verunreinigung

Die Anordnung der Arrayplatten in der gesamten Kamera wurde so gewählt, daß die Blendenblechunterseite sich in der Fokalebene des Teleskops befindet. Die Arrayplattenstärke für alle Detektortypen wurde so gewählt, daß sie gerade noch alle Komponenten aufnehmen kann ohne die mechanische Stabilität zu beeinträchtigen.

6.2 Kamerakopf mit Vorverstärkerblock

Diese Baugruppe ist neben den Arrayplatten die zentrale Einheit der Kamera. Da sie die wesentlichen Elektronik-Komponenten aufnehmen muß und außerdem die lichtdichte Trennebene zwischen dem 3 K und 80 K Niveau bildet, sind in vielerei Hinsicht besondere Anforderungen an sie gestellt. Dies bedeutet u.a. gute thermische Ankopplung an das LHe-Bad, mechanische Stabilität gegenüber Erschütterungen, die Fähigkeit Längenänderungen infolge verschiedener Materialeigenschaften aufzunehmen, möglichst kreuzungsfreie Leitungsführung zu gewährleisten und nicht zuletzt gute mechanische Handhabbarkeit.

Diese Montagegruppe besteht aus folgenden Einzelteilen:

Trägerplatte mit Befestigungsteilen für die Arrayplatten (Zeichng.Nr. E1-001-10)

Platte (Zeichng.Nr. E1-001-11)

Zwischenplatte (Zeichng.Nr. E1-001-12)

Steckplatte (Zeichng.Nr. E1-001-29)

Halterung für Eltec-Widerstände (mit Eltec-Widerständen) Zeichng.Nr. E1-001-28

Vorverstärkerblock mit Abdeckplatte (Zeichng.Nr. E1-001-14,-15)

Heizer (Zeichng.Nr. E1-001-17)

Stecksockel für TO-99-Gehäuse

OP-Verstärker

Aufhängungsteile des Vorverstärkerblocks Zeichng.Nr. E1-001-22 bis -27)

Manganin- und Cu-Leitungen (teflonisoliert Durchm. 0.1 mm bzw. 0.3 mm)

Teflonisolation Durchm. 1 mm

Die mechanische Befestigung der Arrayplatten in der Trägerplatte wird über

Kupfer-Buchsen und zwei V2A-Gewindestangen so realisiert, daß man einerseits hohe Festigkeit, andererseits gute thermische Ankopplung der Platten untereinander und zur Grundplatte erhält (Zeichng.Nr. E1-001-4,-6). Der Kamerakopf (Trägerplatte) hat eine Temperatur von 2.5 K, die auch alle Arrayplatten durch direktes Ankoppeln erhalten.

Elektrisch sind die Arrayplatten über Mikrostecker und die Mikro-Steckplatte (Zeichng.Nr. E1-001-29,-20), die in die Trägerplatte eingelassen ist, mit der Nachfolgeelektronik verbunden.

Die Verteilung der Signal-und Versorgungsleitungen von der Steckerplatte direkt zum Vorverstärkerblock, bzw. über die Ladewiderstände zum Vorverstärkerblock, findet kreuzungsfrei in meanderförmig geführten Kanälen innerhalb der Trägerplatte statt. Zu diesem Zweck besteht diese Trägerplatte aus drei unterschiedlich starken Platten, wobei die obere und untere Platte die eingefrästen Kanäle beinhaltet, und die mittlere Platte die Verbindung über Bohrungen zwischen den Kanälen schafft. Da die Führung der Kanäle über mehrere rechte Winkel in mehreren Ebenen stattfindet, würde der eventuell vorhandene Photonenfluß zur mehrfachen Richtungsänderung gezwungen und dadurch auch zur völligen Absorption.

Der konkrete Leitungsverlauf sieht folgendermaßen aus: von der Steckplatte verlaufen die Signalleitungen (teflonisolierte Manganinleitungen Durchm. 0.1 mm) durch die Trägerplatte hindurch, dann auf der Unterseite dieser Platte in mäanderförmig verlaufenden Kanälchen und Teflonröhrchen mit Durchm. 1 mm, schließlich nochmals durch die Trägerplatte wieder an die Steckerseite, jedoch außerhalb des Bereichs der Arrayplatten zu den Eltec-Rückkopplungswiderständen, die sich auf Halterungen in dafür vorgesehenen Vertiefungen befinden.

Da die Trägerplatte eine Temperatur von 2.5 K hat, erreichen auch die Widerstände diese Temperatur.

Die Weiterführung der Leitungen verläuft durch die Träger- und Zwischenplatte hindurch, wiederum weiter in mäanderförmigen Kanälchen innerhalb der unteren Platte, und schließlich aus dieser Platte nach unten heraus.

Die Biasleitungen (teflonisolierter Manganindraht, Durchm. 0.1 mm) verlaufen in Teflonisolation Durchm. 1 mm durch die Trägerplatte und führen weiter mäanderförmig auf der Unterseite dieser Trägerplatte anschließend durch die beiden folgenden Platten hindurch.

Diese komplizierte Leitungsführung dient der lichtdichten Trennung der Räume unterhalb und oberhalb dieser drei Platten. Um diese Wirkung noch zu verstärken, werden diese drei Platten an den sich berührenden Seiten bei der Herstellung mit Weichlot beschichtet und nach der Montage miteinander verlötet. Alle aus der Unterseite der drei miteinander verbundenen Platten austretenden Leitungen werden zunächst über eine Strecke von ca. 7 mm frei geführt und dann innerhalb des Vorverstärkerblocks verteilt (siehe Abb.37.).

Diese freie Strecke der Leitungen erlaubt es gerade noch, den Betrieb der

Detektoren nicht mit Mikrophonie und Rauschen zu belasten, trotzdem aber eine ausreichende thermische Abkopplung zwischen Cu-Platte und Vorverstärkerblock zu erhalten (zur Berechnung der Wärmeflüsse siehe Kap.6.6).

Der Vorverstärkerblock ist eigentlich eine Untereinheit der Kammera. Da er jedoch elektronisch von dem Kamerakopf z.B. durch Stecker nicht trennbar ist, wird er mit dem Kamerakopf zur einer Baueinheit zusammengefaßt. Die Aufgabe des Vorverstärkerblocks besteht in der mechanischen Halterung aller Operationsverstärker und der beiden Heizplatten, Umverteilung der Leitungen, und Befestigung der Stecker.
Die Verteilung der Signal- und Biasleitungen und der Leitungen zum und vom Stecksockel für die Vorverstärker sowie zu und von den zwei im Vorverstärkerblock integrierten Mikrostecker mit je 100 Kontakten ist im Schaltplan - Abb.42- dargestellt.

Es ist notwendig, die Vorverstärker, nachdem sie nach langer Abkühlphase weit unter der Betriebstemperatur von 50-80 K liegen und dadurch zu hochohmig und nicht mehr betriebsfähig sind, zu heizen.

Die beiden in den Vorverstärkerblock eingelassenen Heizplatten versorgen mit je einer Heizlitze (Cu/Draht, Durchm. 0.3 mm) alle Vorverstärker.

Bei der Konzipierung und Dimensionierung der Aufhängung des Vorverstärkerblocks muß berücksichtigt werden, daß ca. 1/3 der am Vorverstärkerbetrieb anfallenden Wärmemenge über die Signalleitungen zu den auf 2.5 K gekühlten Trägerplatten gelangt. Um diese Trägerplatte mit Wärme nicht noch weiter zu belasten, wird die restliche Wärmemenge vom Vorverstärkerblock zum Kameraboden (Temperatur 5 K) über entsprechend dimensionierte Kühllitzen abgeleitet (Zeichng.Nr. E1-001-8).

Die Aufhängung des Vorverstärkerblocks muß außer der thermischen Abkopplung noch zwei weitere Aufgaben übernehmen.

Einmal muß die mechanische Stabilität der Aufhängung so hoch sein, daß sie im abgekühlten Zustand (LHe) alle vorkommenden Erschütterungen aushält. Zum zweiten müssen die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten $\Delta l/l$ zwischen Teflon und Cu kompensiert werden. $\Delta l/l$ beträgt bei 4.2 K für Cu -3,5‰ und für Teflon -21,5‰. Dies entspricht einer Längenänderung von Δl=0,8 mm. Abb.41 und Zeichnung Nr. E1-001-8 zeigen die Realisierung dieser Aufhängung. Der Teflonblock wird über GFK-Kettenglieder, V2A-Stangen und entsprechend V2A- und GFK-Buchsen so aufgehängt, daß beim Schrumpfen des Blocks lediglich eine Verdrehung der GFK-Kettenglieder um die V2A-Stangen verursacht wird.

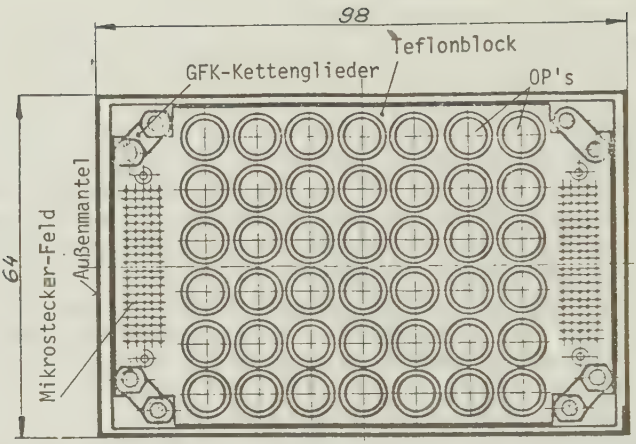


Abb.41 Aufhängung des Teflonvorverstärkerblocks
über GFK-Kettenglieder

Der Wärmefluß geht über die GFK-Kettenglieder zu Cu-Scheiben und dann größtenteils über Cu-Kühllitzen zum separat gekühlten Kameraboden (Zeichnung Nr.E1-001-8). Die Dimensionierung und Profilierung der diversen Stangen und Buchsen wurde so gewählt, daß nur ein Bruchteil der Wärmemenge über die V2A-Stangen zu den auf 2,5 K gekühlten Platten gelangen kann. Genauere Betrachtungen und Berechnungen zu den Wärmeflüssen in der Kamera findet man in Kapitel 6.6.

Die Eltec-Ladewiderstände $R_L = 2 \cdot 10^{10}$ Ohm (bei 4,2 K) werden auf Saphirplättchen mit Spezial-Leit-Silberkleber befestigt. Saphir hat hier den Vorteil, daß er einmal ein sehr guter Isolator ist, andererseits ist die Wärmeleitung sehr gut, sie ist besser als bei Kupfer. Das Saphirplättchen wird samt Widerstand anschließend auf ein vergoldetes Cu-Plättchen mit Hilfe eines aufgelöteten Bügels und des Silber-Epoxy-Leit-Klebers aufgeklebt. Siehe dazu Zeichnung Nr. E1-001-28. Die so beschaffene Halterung mit einem Widerstand wird in die dafür vorgesehenen Vertiefungen in der Trägerplatte mit je einer M3 Schraube montiert. Anschließend werden drei Leitungen, die unmittelbar neben den Vertiefungen aus der Trägerplatte herausragen, an den Widerstand laut Schaltplan Abb.11 angelötet. Um auch hier einen guten Wärmekontakt zwischen Ladewiderstandshalterung und Trägerplatte zu erreichen, wurde die gesamte Trägerplatte vergoldet.

Alle vier Arrayplatten werden in ein in der Mitte der Trägerplatte in einer Vertiefung befestigtes Steckerfeld gesteckt und mit zwei Stiftschrauben (Zeichnung Nr. E1-001-41) an einer der beiden hochstehenden Lippen befestigt. Die zweite Lippe dient zur Führung der beiden Stiftschrauben. Das Steckerfeld besteht aus einer Teflonplatte mit 52 Mikrobuchsen, von denen jedoch nur 40 elektrisch mit den dazu vorgesehenen Manganinleitungen verlötet werden. Eine M3 Schraube in der Mitte des Steckerfeldes verhindert das Herausfallen des gesamten Steckerfeldes. Bis auf vier Biasleitungen werden alle Signalleitungen zu den einzelnen Widerständen innerhalb der Trägerplatte geführt. Nachdem die Signal-, Bias- und Rückkopplungsleitungen die Trägerplatte durch eine Vielzahl mäanderförmiger Kanäle verlassen und über eine freie Strecke von ca. 7 mm geführt werden, werden sie nochmals im Vorverstärker-Teflonblock verteilt. Die Biasleitungen werden direkt zu einem der beiden 100-poligen Stecker geführt, die Signal und Rückkopplungsleitungen zu den OP-Sockeln und erst dann weiter mit den restlichen Versorgungsleitungen zu den beiden 100-poligen Steckern. Von den 42 Sockeln werden, da es nur 36 Kreise gibt, nur 36 benützt. Gegen Herausfallen werden die OP-Sockel mit Kunststoffstangen gesichert. Um den gesamten Vorverstärkerblock auf OP-Betriebstemperatur nach längerer Abkühlzeit zu bringen, muß er auf ca. 80 K hochgeheizt werden. Zu diesem Zweck ist seitlich je ein Heizer angeordnet - Zeichnung Nr. E1-001-17. Die Heizplatte enthält eine Konstantanheizwicklung sowie in Rillen eingeklebte, isolierte Cu-Drähte, die zu den Anschlüssen der OP's führen. Auf diese Weise werden die OP's schneller erwärmt, als wenn sie die Wärme nur über den Teflonblock erhalten könnten.
Beide Heizplatten enthalten je eine Temperaturdiode des Typs 1N 4148. Da an die Meßgenauigkeit der Temperatur des Vorverstärkerblocks keine hohen Anforderungen gestellt werden, reicht eine Zweipunktmessung aus. Dadurch können Leitungen eingespart werden. Die Dioden müssen jedoch vorher einer Eichung unterzogen werden. Die Verdrahtung der Heizer wurde so ausgelegt, daß ein einzelner Fehler, z.B. Bruch einer Lötstelle, nicht zu einem Ausfall der Heizung führen kann. Für beide Heizer sind insgesamt sechs Anschlüsse vorgesehen. Die Verdrahtung vom Detektor bis zum 100-poligen Stecker ist schematisch in Abb.42 dargestellt.

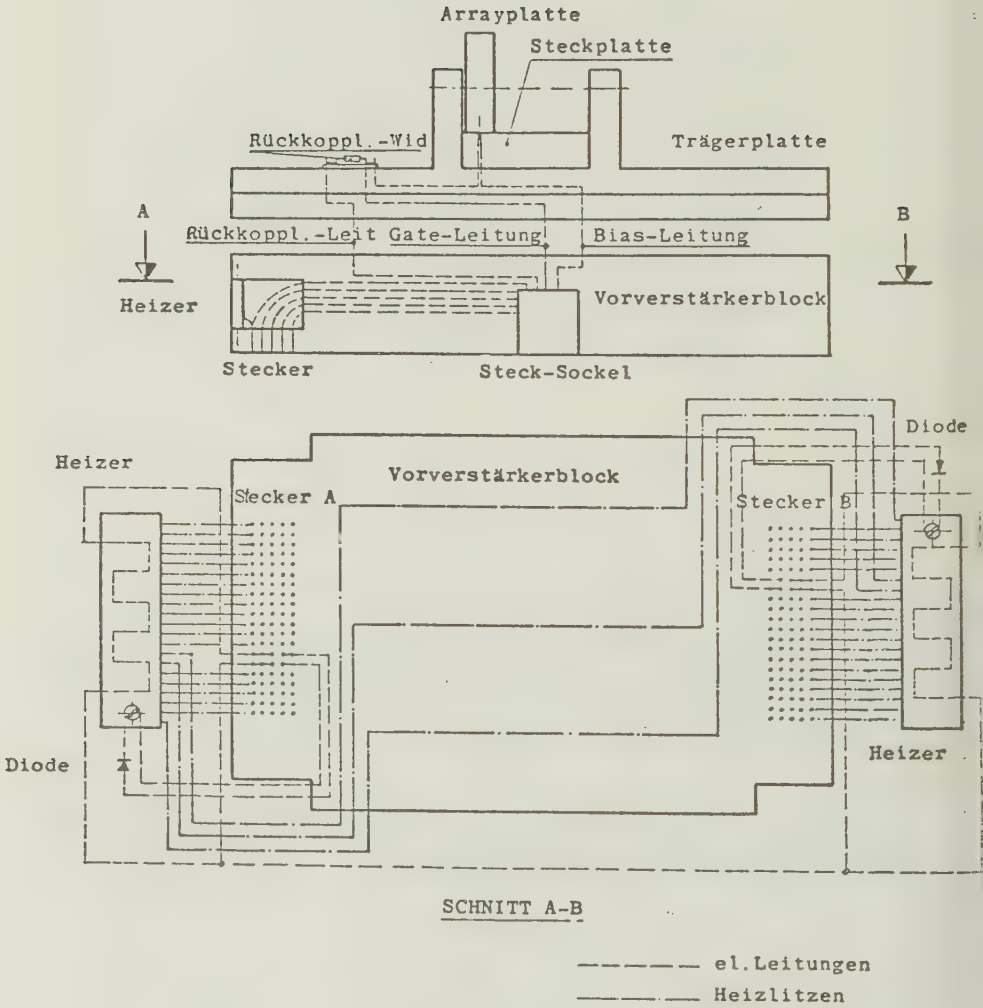


Abb.42 Verdrahtungsplan Trägerplatte-Vorverstärkerblock

6.3 Kameraboden mit Steckern

Der Kameraboden schließt den Vorverstärkerraum nach unten lichtdicht ab und bildet gleichzeitig die Kabeldurchführung und die Kamerasteckerseite. Außerdem bildet der Kameraboden mit den in ihn integrierten Kabeln und den 100-poligen Steckern eine trennbare Schnittstelle zum Vorverstärkerblock. Bei der Demontage dieser Montageeinheit werden z.B. die Vorverstärker leichter zugänglich.

Die Einzelteile dieser Gruppen sind:

Bodenplatte 1 (Zeichng.Nr. E1-001-18)

Bodenplatte 2 (Zeichng.Nr. E1-001-19)

Kabeldurchführung (Zeichng.Nr. E1-001-16)

100-polige Mikrostecker (Zeichng.Nr. E1-001-20,-21)

abgeschirmte Kabel (27-adrig)

Cannonstecker (37-polig)

Die acht 27-adrigen Kabel werden an der einen Seite an zwei Mikrosteckern (je 100 Anschlüsse) angeschlossen. Diese Mikrostecker werden in die entsprechenden Gegensteckerfelder im Vorverstärkerblock gesteckt und verschraubt. Die Kabel verlaufen im Bogen vom Vorverstärkerblock zu den Bodenplatten, in denen sie lichtdicht mäanderförmig und zugentlastet befestigt sind. Im Plattenzwischenraum werden die Einzelleitungen auf die Cannonstecker verteilt. Neben den acht Kabeln verlaufen von der Vorverstärkerblockaufhängung zum Kameraboden 4 Cu-Kühllitzen, die fast die gesamte Wärme des Vorverstärkerblocks zur Bodenplatte abführen.
An der Unterseite des Kamerabodens sind neben den Cannonsteckern Anschraubbohrungen zum Anbringen von Kühlbändern vorgesehen.

Die Befestigung zwischen dem Boden und den übrigen Kamerateilen geschieht über die vier V2A-Gewindestangen, an denen auch der Vorverstärkerblock hängt (Zeichnung Nr. E1-001-3,-4).

6.4 Kameragehäuse

Das Kameragehäuse muß mehrere Aufgaben erfüllen. Die erste Aufgabe ist der lichtdichte Abschluß gegenüber der Umgebung. Zweitens wird duch geeignete Materialwahl (V2A) dafür gesorgt, daß möglichst wenig Wärme zwischen Kamerakopf und Kameraboden fließen kann. Drittens muß das Gehäuse für ausreichende Festigkeit und Steifheit der Kamera sorgen. Schließlich muß der obere Flansch des Kameragehäuses die Hauptkühllitzen aufnehmen. Dieser Flansch bildet außerdem die mechanische Schnittstelle zum GIRL-System.

Das Kameragehäuse besteht aus zwei Teilen:

Flansch (Zeichng.Nr. E1-001-9)

Gehäusemantel (Zeichng.Nr. E1-001-13)

Die gesamte Anordnung, d.h. die drei vorhergenannten Montagegruppen (vier Arrayplatten, Kamerakopf mit Vorverstärkerblock, Kameraboden mit Steckern) werden in dieses Gehäuse folgendermaßen eingebaut:

Zunächst wird der Kamerakopf mit dem Vorverstärkerblock mittels der vier V2A-Gewindestangen und zusätzlicher V2A-Schrauben an den Flansch angeschraubt. Diese Verbindung muß einen ausreichenden thermischen Kontakt herstellen. An der Oberseite des Flansches sind Schrauben zum Anbringen von Kühlbändern vorgesehen. Der Wärmefluß dieser Bänder muß so hoch sein, daß am Kamerakopf eine Temperatur von 2.5 K erreicht wird.
Nach diesem Montageschritt wird der V2A-Mantel über den Vorverstärkerblock geschoben und im Flansch eingerastet. Schließlich werden die Kabelmikrostecker mit dem Vorverstärkerblock verbunden, der Kameraboden auf die vier V2A-Gewindestangen aufgesteckt, und an den Mantel über diese Gewindestangen angepreßt.

Um am Kameraflansch besonders guten thermischen Kontakt zu erhalten, wird dieses Teil matt vergoldet. Die Verbindung Kamera-Flansch-Mantel bzw. Mantel-Kameraboden ist aus Lichtdichtheitsgründen stufenförmig ausgebildet. Wichtig ist bei der Herstellung, daß die angegebenene Toleranzen eingehalten werden. Die Nähte zwischen diesen drei Teilen können zusätzlich mit einem Silber-Leitkleber verspachtelt werden.

6.5 Chopper mit Choppergehäuse, Gestänge und Antrieb

Für die Signalverarbeitung ist ein moduliertes Signal notwendig. Um unabhängig vom Sekundär-Spiegel-Chopper zu sein und außerdem die Möglichkeit des Absolut-Choppings zu haben, verwenden wir einen Chopper, dessen Chopperblatt die Fokalebene nahezu zudeckt bzw. freigibt. Dies wird durch ein über der Fokalebene schwingendes Chopperblatt eines Torsionschoppers erreicht.
Diese Montageeinheit besteht aus:

Choppergehäuse	(Zeichng.Nr. E1-001-50)
Choppergestänge	(Zeichng.Nr. E1-001-52)
Chopperblatt	(Zeichng.Nr. E1-001-58)
Befestigungsbuchsen	(Zeichng.Nr. E1-001-51)
Antriebsspule	(Zeichng.Nr. E1-001-53)
Referenzspule	(Zeichng.Nr. E1-001-54)
Satz Abdeckplatten	(Zeichng.Nr. E1-001-55,-56,-57)
Chopperanschlag	(Zeichng.Nr. E1-001-60)
Chopperstecker	(Zeichng.Nr. E1-001-59,-62)

Die Schwingung des Chopperblattes entsteht durch Torsion eines V2A-Drahtes, der über Schrauben und Buchsen an beiden Enden im Choppergehäuse fest verankert und in der Mitte mit dem Choppergestänge verbunden ist (Zeichng.Nr. E1-001-52).

Ausgelenkt wird das Choppergestänge und dadurch das Chopperblatt über einen im Gestänge befestigten Permanentmagneten und eine Gehäuse befestigte Antriebsspule.
Das Choppergestänge besteht aus dünnen V2A-Röhrchen (Zeichng.Nr. E1-001-52). Ein Röhrchen umhüllt den Torsionsdraht bis 0.5 mm vor den Verankerungspunkten, wo es mit je einem Lager abgeschlossen ist. In der Mitte ist dieses Röhrchen und dadurch das Gestänge mit dem Torsionsdraht verbunden.
Durch diese Lagerung wird verhindert, daß das Choppergestänge aus der federnde Schwingungsachse kippen kann. Um die Schwingungsamplitude vor allem beim Start zu begrenzen, sind zwei federnde Anschläge im Gehäuse untergebracht. Das Chopperblatt schwingt frei über den Arrayplatten in

einer Vertiefung im Kameraflansch. Es ist am Rande abgedeckt und liegt somit geschützt. Alle diese Maßnahmen führen zu einer großen Stabilität des Choppers gegenüber Erschütterungen und manueller Beschädigung bei der Montage. Zur Steuerung von Amplitude, Phase und Frequenz der Antriebselektronik befindet sich über der Antriebsspule eine Referenzspule, in der über einem im Gestänge befestigten Permanentmagneten eine Spannung induziert wird. Der Antrieb selbst erfolgt durch einen weiteren am Gestänge befestigten Permanentmagneten nebst der zugehörigen Antriebsspule. Die elektronische Ansteuerung (Phase-locked-loop-Verstärker) ist im Detai bei [Jaacks, Disertation 1986] beschrieben.

Das Chopperblatt selbst darf keine von den Detektoren nachweisbare Strahlung abstrahlen. Da jedoch nur eine Verbindung über schlechtwärmeleitendes Material für die Kühlung besteht (V2A), muß das Chopperblatt über eine separate Kühllitze gekühlt werden. Damit jedoch die Schwingung nicht durch diese Kühllitze gedämpft wird, besteht die Kühllitze aus gefalteter Kupferfolie. Der Raum, in dem sich der Chopperantrieb befindet, wird fast lichtdicht abgeschlossen, um zu verhindern, daß eventuell an der Spule auftretende Wärme nach außen abgestrahlt wird.
Die Versorgungsleitungen der beiden Spulen verlaufen über den Chopperstecker zum Kameraboden und werden an die dort befindlichen Cannonstecker angeschlossen.
Die Eigenfrequenz des Choppers wird durch die Drahtlänge, den Drahtdurchmesser und das Trägheitsmoment des Gestänges bestimmt. Durch ein angebrachtes Gewicht kann das Trägheitsmoment und damit die Eigenfrequenz variiert werden. Bei unserer Anordnung liegt die Eigenfrequenz bei 10 Hz. Die typische Verlustleistung liegt bei 1 mW.
Das Choppergehäuse mit Inhalt ist eine separate Einheit, die gleichzeitig die Kamerahalterung des GIRL-Kryostaten mit der IR-Kamera verbindet.

6.6 Wärmeflüsse zu und innerhalb der Kamera

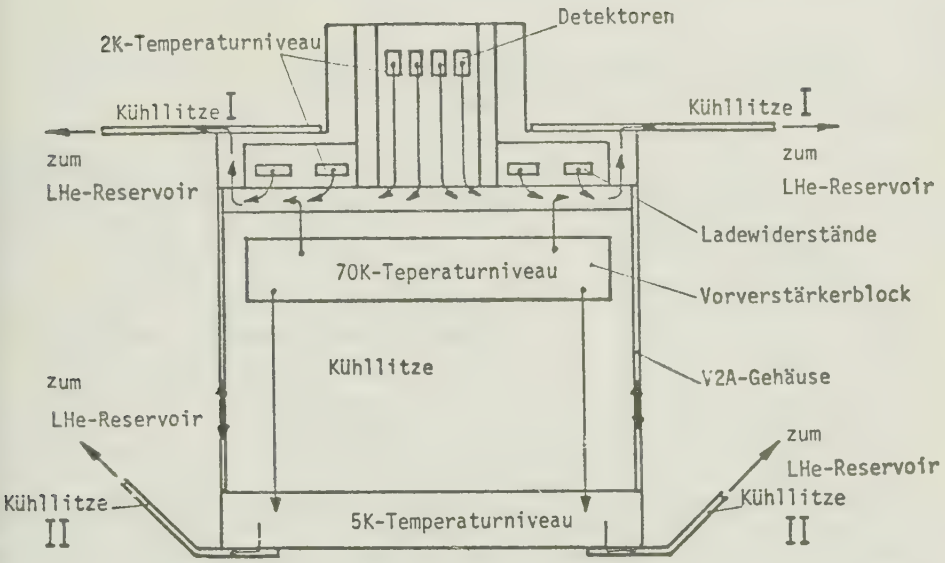


Abb.43 Schematische Darstellung der Wärmeströme innerhalb der Kamera

In Abb.43 sind die Wärmeströme innerhalb der Kamera dargestellt. Bei der Berechnung dieser Ströme und der Dimensionierung der entsprechenden Kühllitzen ist darauf zu achten, daß die Temperaturniveaus erreicht werden.

Für den Wärmestrom durch einen Festkörper von einheitlichem Querschnitt gilt:

$$(24) \qquad Q = a/l \int_{T_1}^{T_2} \lambda^* \, dT \; [W]$$

a = Querschnittsfläche [cm^2]
l = Festkörperlänge [cm]
T_1, T_2 = Temperaturen an den Enden eines Festkörpers
λ^* = Wärmeleitfähigkeit [Watt/cmK]

Aus Tabelle 9 können direkt einige Wärmeleitungsintegrale $\int_{T_1}^{T_2} \lambda^* \times dT$ entnommen werden. [Handbuch der Kryotechnik]

T_L [K]	Wärmeleitungsintegrale $\int_{T=4K}^{T_L} \lambda^* dT$ [W cm^{-1}]							[W cm^{-1} 10^{-3}]	
	Kupfer		Manganin	Messing	Aluminium	Edelstahl	Glas	Kunststoffe	
	elektrol. Zähkupfer	phosph. desoxid.				AISI 303, 304, 316 317	Pyrex Quarz Borsilik.	Teflon	Hy
6	8,0	0.176		0,053	1,38	0,0063	2,11	1,13	0,3
10	33,2	0,785		0,229	6,07	0,0293	6,81	4,4	1,4
20	140	3,95		1,12	27,6	0,163	20,0	16,4	8,2
40	406	16,4	1,54	4,76	96,2	0,824	58,6	50,8	30,
60	537	35,5	3,74	10,4	170	1,93	115	93,6	65,
76	686	53,9	5,76	16,2	220	3,17	175	130	13
80	707	58,9	6,28	17,7	232	3,49	194	139	142
100	802	85,8	8,98	25,5	284	5,28	292	187	204
120	891	115	11,8	36,5	330	7,26	408	237	269
140	976	146	14,7	47,8	376	9,39	542	287	336
160	1060	180	17,8	60,3	420	11,7	694	338	405
180	1140	215	21,0	73,8	464	14,1	858	390	475
200	1220	253	24,3	88,3	508	16,6	1030	442	545
250	1420	353	33,4	128	618	23,4	1500	572	720
300	1620	461	43,8	172	728	30,6	1990	702	895

Tab.9 Wärmeleitungsintegrale einiger Werkstoffe

Für beliebige Temperaturdifferenzen gilt:

$$(25) \qquad Q \times l/a = \int_{T=4K}^{T_1} \lambda^* \times dT - \int_{T=4K}^{T_2} \lambda^* \times dT$$

Für die Trägerplattetemperatur wurde für die Zwecke der Berechnung der Wärmeleitung ein Wert von 4,2 K angenommen.

Der durch diese Annahme hervorgerufene Fehler ist vernachlässigbar (typisch 1%).

Wärmestrom - Vorverstärker - Trägerplatte

(Verwendeter Draht: Durchm. 0,1 mm, Länge l = 5 mm, Teflonisolation 0,1 mm stark)

Manganindrähte: $\int_{LHe}^{LN_2} \lambda^* \cdot dT = 3{,}74$ W/cm

$a = 7{,}85 \times 10^{-5}$ cm^{+2}

50 x $l = 0{,}5$ cm

$Q = 29{,}5$ mW

Teflonisolation: $\int_{LHe}^{LN_2} \lambda^* \cdot dT = 93{,}6 \times 10^{-3}$ W/cm

$a = 6{,}27 \times 10^{-4}$ cm^2

50 x $l = 0{,}5$ cm

$Q = 5{,}86$ mW

Wärmestrom - Vorverstärkerblock - Kameraboden

Manganindrähte: $\int_{LHe}^{LN_2} \lambda^* \cdot dT = 3{,}74$ W/cm

$a = 7{,}85 \times 10^{-5}$ cm^2

200 x $l = 9$ cm

$Q = 6{,}52$ mW

Teflonisolation: $\int_{LHe}^{LN_2} \lambda^* \cdot dT = 93{,}6 \times 10^{-3}$ W/cm

$a = 6{,}27 \times 10^{-4}$ cm^2

200 x $l = 9$ cm

$Q = 1{,}3$ mW

Schutzhülle: $\int_{LHe}^{LN_2} \lambda^* \cdot dT \sim 93{,}6 \times 10^{-3}$ W/cm

$a = 0{,}02$ cm^2

8 x $l = 9$ cm

$Q = 1{,}64$ mW

GFK-Kettenglieder: $\int_{LHe}^{LN_2} \lambda^* \cdot dT = 85{,}9 \times 10^{-3}$ W/cm

$a = 0{,}03$ cm^2

4x $l = 0{,}7$ cm

$Q = 15$ mW

Da die GFK-Kettenglieder direkt an eine Cu-Kühllitze des Durchmessers 0,2 mm angeschlossen werden, die zum Kameraboden die Wärme ableiten, wird die Temperatur am Ende der Kühllitze mit 4,2 K angenommen (Zeichng.Nr. E1-001-8).
Aus dieser Zeichnung ist ersichtlich, daß der Wärmefluß durch entsprechende Geometrie zu einem ganz bestimmten Weg gezwungen wird.
Um die abgeführte Wärmemenge von Vorverstärkerblock reduzieren zu können, können die unteren Kettenglieder herausgenommen werden. Mechanische Tests zeigen, daß die Festigkeit dennoch ausreicht.

Wärmestrahlung vom Vorverstärkerteflonblock:

$\varepsilon = 1$ (Emissionsgrad Annahme)
$F = 1{,}71 \times 10^{-2}\ m^2$ (Teflonblockfläche)
$T = 60\ K$

(25) $P = \sigma \times \varepsilon \times F \times T^4 \qquad = 5{,}67 \times 10^{-8}\ W/m^2 \times K^4$
$= 12{,}5\ mW$

Der gesamte Wärmestrom vom Teflonblock zu gekühlten Flächen beträgt 72,1 mW. Die Operationsverstärker LF 441 verbrauchen zusammen bei 70 K ca. 36 mW. Der Vorverstärkerblock kühlt also langsam ab. Während der Abkühlphase wird im Normalfall mit der Kamera beobachtet bzw. die Kamera wird geeicht. Zwischen den Messungen kann dann der Teflon-Vorverstärkerblock auf die notwendige Temperatur hochgeheizt werden. Es ist jedoch möglich, auch während der Beobachtung den Vorverstärkerblock zu heizen. Um die gesamte Kamera kühlen zu können, werden 8 Kupfer-Kühl-Bänder im GIRL-Kryostaten für die Kamera bereitgestellt.
Für Tests in userer Anlage wurden Kühllitzen aus hochreinem Kupfer verwendet. Im Diagramm Abb.44 ist der Unterschied der Wärmeleitung von Elektrolyt-Kupfer zu hochreinem Kupfer deutlich zu erkennen. Die Wärmeleitung bei 4,2 K verbessert sich bei hochreinem Kupfer gegenüber dem Elektrolytkupfer um mehr als eine Zehnerpotenz.

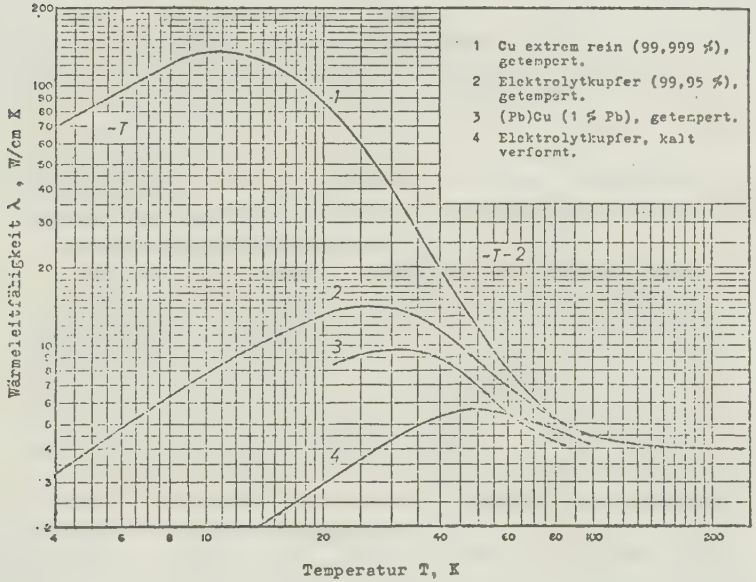


Abb.44 Wärmeleitfähigkeit von Kupfer unterschiedlicher Reinheit; Einfluß der Vorbehandlung [Denner]

Für die Kühlbänder - siehe Abb.43 - wurden folgende Maße gewählt:

I 4 x 25 mm x 65 mm x 0,5 mm (am Kamerakopf befestigt)
II 4 x 25 mm x 150 mm x 0,5 mm (am Kameraboden befestigt)

Beim Kamerabetrieb fließen über die Kühlbänder folgende Wärmemengen ab:

Kühlbänder I 45,1 mW
Kühlbänder II 19,4 mW

Die Temperatur am Kameraboden und am Kamerakopf wird über zwei an diesen Stellen befestigte Dioden gemessen.

6.7 Eichquelle

Ein wichtiger Punkt bei der Auslegung der Kamera ist auch deren Eichung. Die Kamera bzw. die einzelnen Detektorkreise müssen von Zeit zu Zeit und vor allem nach jeder Inbetriebnahme geeicht werden. Dies kann auf drei Arten geschehen:

a) Eichung an bekannten Sternen oder Planeten
b) Eichung über die GIRL-Eichquelle
c) Eichung über die eigene Kamera-Eichquelle

Es ist vorgesehen, vor der Kamera an der Kamerahalterung des GIRL-Kryostaten eine Eichquelle anzubringen (Zeichng.Nr. E1-001-1).

Diese Eichquelle besteht aus folgenden Teilen:

IR-Eichquellengehäuse (Zeichng.Nr. E1-001-67)

Halterung für Eichquellengehäuse (Zeichng.Nr. E1-001-68)

2 Saphirscheiben

Heizdraht (Konstantan)

Zuleitungsdraht (teflonisoliert)

Die Strahlung entsteht durch das Heizen eines dünnen Konstantandrahtes (Durchm. 0,1 mm). Die Enden des Heizdrahtes sollen auf dem Niveau der Badtemperatur liegen, und der Spannungsabfall soll hauptsächlich zwischen ihnen stattfinden. Um dies zu erfüllen, werden Zuleitungen bis zu der Heizschleife aus teflonisoliertem Cu-Draht verwendet, die auf der Rückseite der Eichquelle zwischen zwei Saphirscheiben geklemmt werden. Durch diese Klemmung wird für ausreichende Kühlung dieser Leitungen gesorgt. Die Fortsetzung der Versorgungsleitungen kann an den Kameraboden zu den Cannonsteckern geführt werden.

Durch diesen Eichquellenaufbau ist es möglich, sowohl kontinuierliche als auch modulierte Strahlung bis zu 10 Hz zu erzeugen. Diese Eichquelle entspricht in ihrem Aufbau und ihrer Fuktion im wesentlichen der IR-Quelle, die bereits in Kapitel 3.3.1.2 beschrieben wurde. Das theoretische Verhalten der Eichquelle im moduliertem Betrieb ist beschrieben bei [Pribil].

7.0 Kameratests

Nachdem die einzelnen Kamerakomponenten und Baugruppen (Detektoren, OP-Verstärker, Elektronikkreise) bereits einzeln getestet worden sind, muß untersucht werden, in wieweit die erreichten Messergebnisse aus den einzelnen Messungen auch innerhalb der Kamera erreicht werden können. Wichtig ist auch, ob und in wieweit sich die einzelnen Detektorkreise gegenseitig beeinflussen. Getestet werden muß weiterhin das thermische Verhalten der Kamera, vor allem, ob die geforderten Temperaturen an den entsprechenden Stellen beim Betrieb der Kamera eingehalten werden können. An die Funktionsfähigkeit der Kamera werden folgende Anforderungen gestellt:

a. Mechanische Stabilität gegenüber Erschütterungen bei LHe-Temperatur (Rütteltests)

b. Erreichen der notwendigen Temperaturen an entsprechenden Komponenten (2,5 K an den Arrayplatten und Ladewiderständen, 60 K am Vorverstärkerblock)

c. Erreichen der gewünschten NEP-Werte (NEP < 1×10^{-16} $W/\sqrt{Hz}$)

7.1 Rütteltests einiger Kamerakomponenten

Zu Punkt a. wurden nur teilweise Tests durchgeführt, da am AIT nicht entsprechende Vorrichtungen vorhanden sind, die gestatten würden, die gesamte Kamera bei Kryobedingungen zu rütteln. Am AIT wurde ein Ingenieurmodell gebaut, die Rütteltests werden erst an einem Qualifikationsmodell bei einer für diese Zwecke eingerichteten Firma durchgeführt. An den wichtigsten Komponenten und dies betrifft die auf Saphir montierten Detektoren mit den gesamten Arrayplatten, Steckern und Kontaktierungen, wurden Rütteltests bei LN_2-Temperatur am Battelle Institut in Frankfurt in einem von uns entwickelten Kryostaten vorgenommen (s.Abb.45). Dieser Kryostat wurde für LN_2 Temperatur konzipiert und konnte auf einem Rütteltisch montiert werden.

Gerüttelt wurde mit folgenden Parametern:

3 g von 3 Hz bis 250 Hz
10 g von 15 Hz bis 250 Hz
20 g von 25 Hz bis 200 Hz

Alle gerüttelten, bestückten Arrayzeilen überstanden diese Rütteltests ohne beschädigt zu werden.

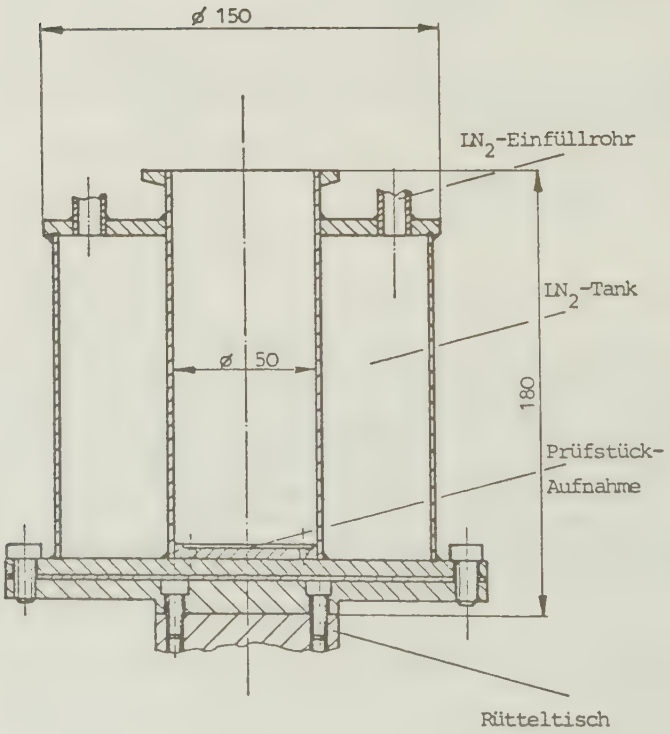


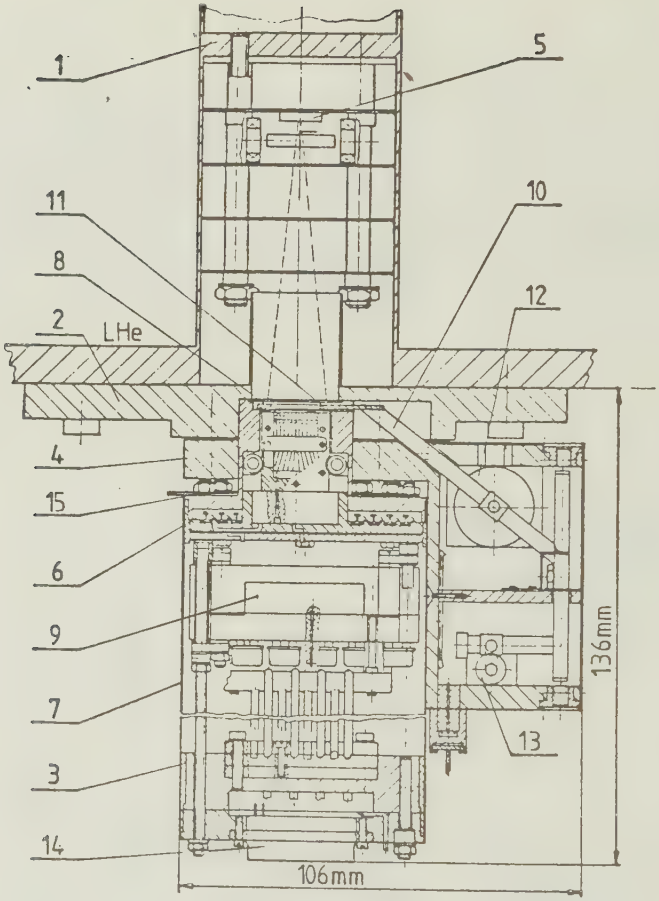
Abb.45 Rüttelkryostat

7.2 Testanordnung für Kameratests

Verwendet wird hier der von uns entwickelte Kryostat, der bereits im Kap. 3.4.1 beschrieben wurde. In der Einbuchtung des LHe-Tanks befindet sich ein schwarzer Körper (sh. Zeichnung Nr.Kryostat 2 im Anhang). Die Kamera wird samt dem Chopper über eine Adapter-Scheibe am LHe-Tankboden befestigt. Vom Rand des vergoldeten LHe-Tankbodens verlaufen Kühlbänder aus hochreinem Cu (Anschlußflächen auch vergoldet siehe Abb.46).
Der Abstand zwischen dem schwarzen Körper und der Detektorenebene beträgt 73,8 mm. Daraus ergibt sich für die NEP-Berechnung

$$NEP = 6.55 \times 10^{-19} \times T^4 \times F' \times Fm \times U_R/U_S \; \Delta f^{-1/2} \; [W/\sqrt{Hz}\,] \quad \text{(sh.Kap.4.1)}$$

T : Schwarzkörpertemperatur
F': Reduzierfaktor (Abhängig von Detektorempfindlichkeit)
Fm: Choppermodulationsfaktor, typisch 0,4
U_R: Rauschspannung
U_S: Signalspannung
Δf: Bandbreite



1: Einbuchtung im LHe-Kryostatboden
2: Zwischenflansch
3: Bodenplatte
4: Chopperhalterung
5: Schwarzer Körper
6: Ladewiderstände
7: Kameragehäuse
8: Chopperabdeckplatte
9: Heizplatte
10: Choppergestänge
11: Chopperblatt
12: Referenzspule
13: Antriebsspule
14: Cannon-Stecker
15: Kühllitze

Abb.46 Kamera montiert auf einem Kryoboden

7.3 Thermisches Verhalten der IR-Kamera

Als erstes wurde das thermische Verhalten der Kamera untersucht. Im Diagramm Abb.47 ist der Abkühlzyklus des Vorverstärkerblocks gegen die Zeit aufgetragen. Um diesen Block von 93K auf ca. 55K abzukühlen, ist eine Zeit von 10 Stunden notwendig.

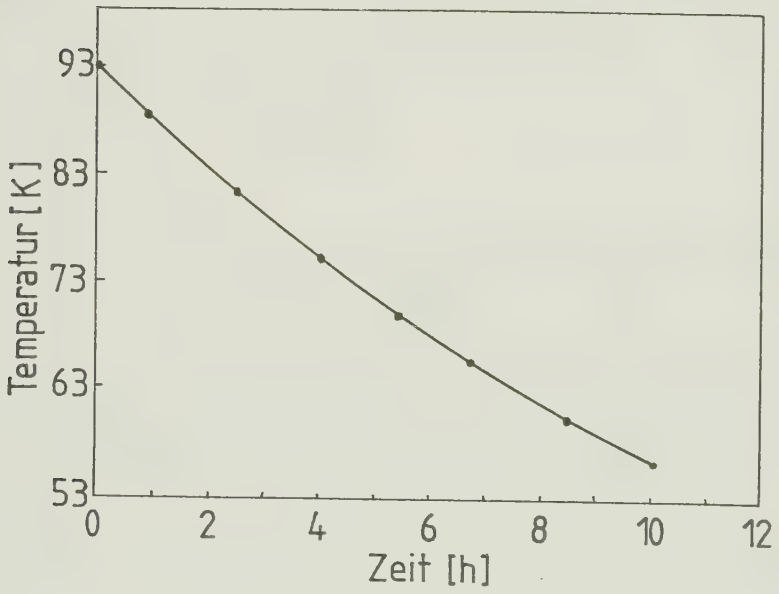


Abb.47 Abkühlzyklus des Vorverstärkerblocks nach dem Einfüllen von LHe in den Kryostaten

Um den Vorverstärkerblock auf seiner Arbeitstemperatur zu halten, ist Heizung notwendig. Im folgenden Fall wird der Vorverstärkerblock mittels der beiden Heizer geheizt (OPs sind nicht in Betrieb). In Abb.48 ist der Temperaturverlauf dargestellt.

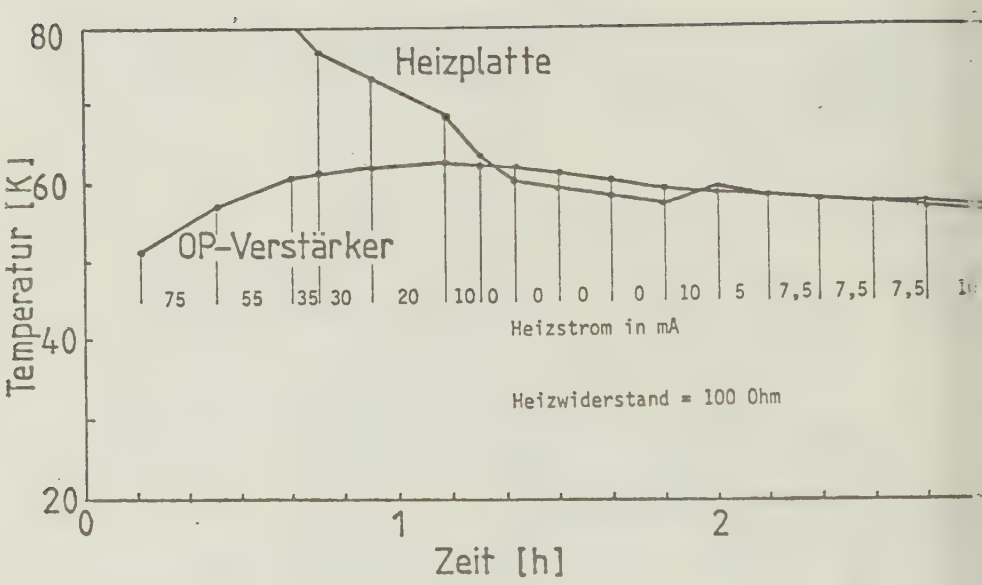


Abb. 48 Temperaturverlauf des Vorverstärkerblocks in Abhängigkeit von der Heizleistung (an zwei Stellen gemessen)

Aus der Abb.48 ist zu erkennen,daß sich zwischen 20 und 15 mA Heizstrom (entspricht 22,5 bzw. 40 mW) eine annähernd konstante Temperatur des Teflonblocks von ca. 60K einstellt.
Da die verwendeten Operationsverstärker LF441 bei ca. 65 K Betriebstemperatur eine Verlustleistung von ca. 1 mW pro Kreis aufweisen [Jaacks], fällt beim Betrieb der Kamera eine Wärmemenge von ca. 36 mW an. Für den Betrieb der Kamera bedeutet es folgendes: wird der Vorverstärker auf ca. 75 K aufgeheizt, und anschließend alle Kreise in Betrieb genommen, kann ca. 1,5 Stunden gemessen werden, ohne zusätzlich heizen zu müssen. Nach dieser Zeit erreicht der Vorverstärkerblock eine Temperatur von 60 K. Für den nächsten Meßzycklus müssen die Vorverstärker erneut aufgeheizt werden.

7.4 Betrieb der Detektoren innerhalb der Kamera

Beim Betrieb der Kamera hat sich folgendes gezeigt: die optimale Betriebstemperatur ist nicht für alle Operationsverstärker gleich. Unterhalb 60 K steigt das Rauschen bei vielen OP's stark an. Aus diesem Grund muß sorgsame Auswahl der Operationsverstärker getroffen werden. Gegenüber den vorherigen Überlegungen muß die Vorverstärkertemperatur also minimal 60 K betragen. Dies führt jedoch dazu, daß der Kamerakopf mit Detektoren und den Ladewiderständen nicht unter 3 K abzukühlen ist. Dies ist jedoch für den Betrieb der Ge:Ga und Ge:Be Detektoren durchaus noch zulässig. Bei der unten aufgeführten Messung lag die Eigenfrequenz des Choppers bei 12,6 Hz. Dies hatte auch eine Messbandbreite von 1,26 Hz zur Folge. In der Tab.10 sind die Ergebnisse eines Kamera-Tests aufgeführt. Da zu diesem Zeitpunkt noch nicht alle Ge:Ga Detektoren geliefert waren, sind die restlichen zwei Detektorplätze leer geblieben. Das bedeutet, daß in diesen beiden Fällen nur das Rauschen der Ladewiderstände gemessen werden konnte.
Die dargestellte Messung zeigt die ersten Daten der (fast) vollständig integrierten Kamera. Ein elektrisches Übersprechen (auf die nicht mit Detektoren bestückten Kreise) konnte nicht festgestellt werden. Für einige der Kreise, die nicht auf Anhieb die gefordete NEP unterschritten, konnte exemplarisch gezeigt werden, daß ein Austausch von Ladewiderstand und / oder OP nötig ist, um die gewünschten Resultate zu erreichen. Bei der Messung ist weiter zu beachten, daß nur jeweils für einen Detektortyp (hier Si:Ga) der Strahlungsfluß so eingestellt werden kann, daß eine NEP von 10^{-16} $W/\sqrt{Hz}$ unterschritten wird (s.Kap.4). Es konnte jedoch gezeigt werden, daß für jeden Detektortyp die Anforderungen auch beim Betrieb in der integrierten Kamera erfüllt werden.

Tab.10

Kreis Nr.	Detektor	SK-Temperatur [K]	Signal/Rauschen bei opt.U_B	NEP $W/\sqrt{Hz}$
1	Si:Ga	110	500	$4,2 \times 10^{-16}$
2	"	"	2500	$8,4 \times 10^{-17}$
3	"	"	2533	$8,2 \times 10^{-17}$
4	"	"	583	$3,6 \times 10^{-16}$
5	"	"	833	$2,5 \times 10^{-16}$
6	"	"	2222	$9,4 \times 10^{-17}$
7	"	"	2833	$7,4 \times 10^{-17}$
8	"	"	--	--
9	"	"	1333	$9,6 \times 10^{-17}$
10	"	"	1125	$1,8 \times 10^{-16}$
11	"	"	2647	$7,9 \times 10^{-17}$
12	"	"	1875	$1,1 \times 10^{-16}$
13	Si:P	"	32380	$6,1 \times 10^{-16}$
14	"	"	41666	$4,8 \times 10^{-16}$
15	"	"	22222	$9,0 \times 10^{-16}$
16	"	"	42307	$4,7 \times 10^{-16}$
17	"	"	31111	$6,4 \times 10^{-16}$
18	"	"	31111	$6,4 \times 10^{-16}$
19	"	"	46666	$4,2 \times 10^{-16}$
20	"	"	--	--
21	"	"	47619	$4,1 \times 10^{-16}$
22	"	"	31111	$6,4 \times 10^{-16}$
23	"	"	46666	$4,2 \times 10^{-16}$
24	"	"	28571	$7,0 \times 10^{-16}$
25	Ge:Be	60	6250	$9,1 \times 10^{-17}$
26	"	"	5000	$1,1 \times 10^{-16}$
27	"	"	6428	$8,8 \times 10^{-17}$
28	"	"	5625	$1,0 \times 10^{-16}$
29	"	"	3333	$1,7 \times 10^{-16}$
30	"	"	1000	$5,7 \times 10^{-16}$
31	"	"	1428	$4,0 \times 10^{-16}$
32	"	"	4000	$1,4 \times 10^{-16}$
33	--	"	--	--
34	Ge:Ga	"	65454	$2,0 \times 10^{-16}$
35	Ge:Ga	"	66666	$1,8 \times 10^{-16}$
36	--	"	--	--

8.0 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, eine Kamera für den IR-Wellenlängenbereich 3-120 µm zu entwerfen und aufzubauen, die mit dem Space-Shuttle im Rahmen des GIRL-Projekts in den Orbit gebracht werden sollte. Die Aufgabe dieser Kamera sollte es sein, außerhalb der Erdatmosphäre in einer Höhe um 425 Kilometer mit höchster Empfindlichkeit, die an die theoretische Empfindlichkeitsgrenze für photoleitende Detektoren bei dieser Wellenlänge stößt, sehr schwache astronomische Objekte zu beobachten. Das Gesichtsfeld der Kamera wurde so aufgebaut, daß durch Versetzen der Kamera um bestimmte Schrittweiten in X-und Y-Richtung ein flächendeckendes Bild einer ausgedehnter Quelle entstehen kann. Da in vier Wellenlängen-Bändern gleichzeitig beobachtet wird, ist es möglich, durch geeignete Algorithmen aus den Isophoten (Linien gleicher Helligkeit) näherungsweise Temperaturen der beobachteten Region zu berechnen, falls die Emission thermischer Natur ist.
Die Schwierigkeit beim Aufbau dieser Kamera lag Anfangs darin, daß die für diesen Wellenlängen-Bereich notwendigen Photoleiter nicht vorhanden bzw. noch nicht von der Industrie entwickelt worden waren.
Der Aufbau der Fokalebene der Kamera durch einzelne Detektoren der höchsten Empfindlichkeit hat gegenüber anderen Systemen den Vorteil, daß bis zu der Wellenlänge von 120 µm mit der Empfindlichkeit $< 1 \times 10^{-16}$ $W/\sqrt{Hz}$ beobachtet werden kann. Durch die Anordnung der Detektoren in abgetrennten Kanälen wird das optische und elektrische Übersprechen zwischen den einzelnen Detektoren verhindert. Da diese Detektoren bei Temperaturen < 4,2 K betrieben werden müssen, bei denen sie Widerstandswerte von mehr als 10^{12} Ohm erreichen, müssen sich aus schaltungselektrischen Gründen die Transimpedanzwandler in der Nähe der Detektoren befinden und somit auch bei Kryobedingungen betrieben werden. Die verwendeten Vorverstärker müssen selbst bei Temperaturen um 70 K betrieben werden damit sie funktionieren. Dies erfordert mechanische, thermische und optische Trennung der Vorverstärker von der Umgebung und vor allem vom Detektorraum. Durch spezielle Aufhängung und Kapselung der Vorverstärker wurden diese Bedingungen erreicht. Auch an dieser Stelle wurde darauf geachtet, daß die Vorverstärker leicht durch andere Typen ersetzt werden können, die günstigere Eigenschaften aufweisen.
Da es für bestimmte Beobachtungs-Modi sinnvoll ist, den Strahlungsfluß zum Detektor periodisch zu unterbrechen (Choppen), wurde dicht vor der Detektorebene ein Blatt eines speziellen Torsionschoppers angeordnet. Dieser Chopper erlaubt ein sogenanntes "Absolut Chopping", das z.b. notwendig beim Beobachten ausgedehnter Quellen ist. Der vom GIRL-Teleskop angebotene Sky-Chopper würde im Fall einer augedehnten Quelle zu große Meßfehler induzieren. Außerdem erhöht unser Chopper die Betriebssicherheit im Fall eines Defektes des Sekundär-Spiegel-Choppers. Der Chopper ist in der Kamera die einzige bewegliche Komponente. Da es sich um einen

Weltraumeinsatz handelt, werden besonders hohe Anforderungen an seine Zuverlässigkeit gestellt. Das Torsionsprinzip dieses Choppers ermöglicht den Einsatz dieses Teils bei hohen Beschleunigungen und Erschütterungen. Um das LHe-Reservoir möglichst wenig belasten, darf die Leistungaufnahme nicht zu hoch sein. Sie liegt bei 1 mW.
Ein weiterer Punkt ist der Einsatz von IR-Filtern, die den einzelnen Detektoren innerhalb der Detektorkanäle vorgeschaltet werden, und somit das durch Mehrfachreflexionen innerhab der Filter auftretende Übersprechen verhindern. Sie sollen die kurzwelligen Photonen entsprechend dem intrinsischen Übergang im reinen Halbleiter abblocken.
Am AIT wurde ein Labormodell aufgebaut, das geeignet ist für den Weltraumeinsatz qualifiziert zu werden. Bei diesem Modell wurden alle Funktionen der Kamera verifiziert. Die vorgegebenen Spezifikationen wurden erreicht.

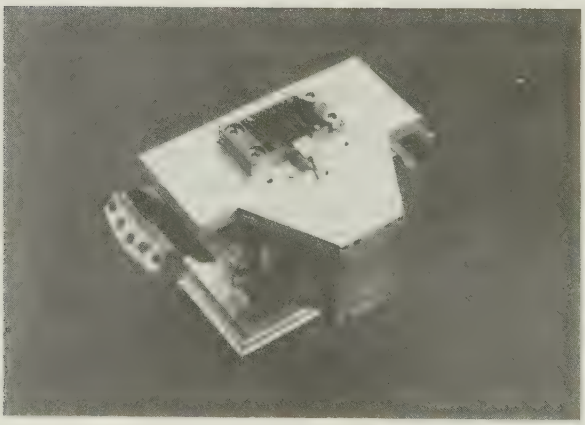


Abb.49 Foto der Kamera ohne Außenmantel

9.0 Ausblick

Die Entwicklung immer empfindlicherer und leistungsfähigerer astronomischer Instrumente für die IR-Astronomie geht Hand in Hand mit der Entwicklung der Halbleitertechnologie und der Mikroelektronik. Bei der Verwendung von Komponenten aus diesen beiden Bereichen ist die Leistungsfähigkeit eines Instrumentes durch diese Komponenten begrenzt. Es wäre für die Zukunft wünschenswert, die Kamera so aufzubauen, daß sie eine noch niedrigere Leistungsaufnahme aufweist als es im Moment der Fall ist. Dadurch würde beim Weltraumeinsatz eine längere Standzeit des Kühlsystems, und damit auch eine längere Beobachtungszeit möglich werden. Am Astronomischen Institut Tübingen wurden in dieser Richtung bereits erste Voruntersuchungen vorgenommen. So hatte Herr Frick in seiner Diplomarbeit GaAs-Fet's untersucht. Der Vorteil solcher Fet's ist, daß sie auch bei Temperaturen um 4,2 K arbeiten und eine sehr niedrige Leistungsaufnahme aufweisen [Frick]. Wünschenswert wären wegen ihrer einfacheren Handhabung und wegen ihres kleineren Leitungsbedarfs Operationsverstärker, die auf der Basis der GaAs-Fet's aufgebaut sind und dadurch auch bei LHe-Temperatur betrieben werden können. Solche Bauteile sind zur Zeit jedoch noch nicht verfügbar.
Der zweite Punkt bei eventueller Entwicklung eines verbesserten Kamerasystems ist die Ausnutzung der Druckvariabilität der Cut-of-Wellenlänge der Photoleiter [Kazanskii], [Haller]. Durch Drücken der Photoleiter-Kristalle wird die langwellige Empfindlichkeitsgrenze zum Langwelligen hin verschoben. Durch kontroliertes Drücken einer Photoleitersäule, und durch die Anwendung spezieller Auswerte-Algorithmen [Riegger] könnte ein Spektrometereffekt erreicht werden. Die erreichbare Auflösung eines solchen Systems $\lambda / \Delta\lambda$ könnte durchaus über 1000 liegen. Bei einer Anordnung von mehreren drückbaren Detektorsäulen zu einem Kamera-Array bei Verwendung verschiedener Detektortypen könnte ein flächendeckendes Spektrometer entstehen. Dieses wäre in der Lage, nicht nur ein Bild einer ausgedehnter Quelle zu liefern, sondern gleichzeitig auch das Spektrum an jedem Punkt dieser Quelle. Auch zu dieser Problematik wurden am Astronomischen Institut Tübingen bereis erste Voruntersuchungen durchgeführt. So konnte das Problem der genauen Druckmessung bei Kryobedingungen, das eine der Vorrausetzungen für die Aufnahme eines Spektrums ist, gelöst werden.

Literaturverzeichnis

Battelle Bericht 01TL 038A-AK/RT/WRT2078, Stufe I und Sutufe II

Bode, D. E., Bratt, P. R.: Multielement Infrared Detector Array Technology at the Santa Barbara Research Center, SPIE 95, 124 (1976)

Bratt P.R., Lewis N.N., Long L.E.: Continued Development of Doped-Germanium Photoconductors for Astronomical Observations at Wavelengths from 30 to 120 µm, Final technical Report No. NAS2-9599 SBRC (1978)

Brunsmann, U.: Photoconductor Development at the Battelle-Institut e.V., Frankfurt am Main, Proc. of the Second ESO Infrared Workshop, Garching (1982)

Brunsmann, U.: ESTEC/Battelle, private Mitteilung (1982A)

Brunsmann, U.,Frenzel, O., Egle H., Kottler W., Dinges P., Fischbach J.U.: Forschungs- und Entwicklungs-Arbeiten über höchstempfindliche Infrarotdetektoren, Phase III, VQM, Abschlußbericht (1982)

Bubenzer, A., Dischler, B., Brandt, G., Koidl, P.: rf-plasma deposited amorphous hydrogenated hard carbon thin films: Preparation, properitis, and applications, J. Appl. Phys. 54 (1983)

Clark R.J.: Proceedings of the IRE (1481), Vol.47, No.9,

Datenblatt für Ge:Be-Detektor DS 62, Battelle (1982)

Denner, H.D.:Entnommen aus Handbuch BW 3474,Materialeigenschaften bei tiefen Temperaturen

Drapatz, S.: Infrarotastronomie, Physik in unserer Zeit 11, 145 (1980)

Fischbach, J. U., Brunsmann, U., Frenzl, O., Egle, H., Meyer, O.: High Sensitivity Si:P and Ge:Li Photoconductive i.r. Detectors for Low Photon Background Applications,Infrared Phys. 21, 207 (1981)

Fischbach, J. U., Brunsmann, U., Frenzel, O., Egle, H., Forschungs- und Entwicklungs-Arbeiten über hochempfindliche Detektoren für den fernen infraroten Spektralbereich, Battelle-Abschlußbericht Stufe II 01TL038 A-AK/RT/WRT 2078 (1980)

Frick, D.: Optimierung kalter Vorverstärker für höchstempfindliche Infrarotdetektoren, Diplomarbeit am AIT (1984)

Haller, E.E., Hueschen, M.R., Richards, G.L.: Appl. Phys. Lett. 34, 495 (1979)

Handbuch der Kryotechnik,Lehrgang Berlin 3-7.10.1977, VDI-Bildungswerk

Hecht E., Zajac A.: Optics, Addioson-Wesley Publishing Company (1979)

Holter M.R., Nudelman S., Suits G.H., Wolfe W.L., Zissis G.J.: Fundamentals of Infrared Technology, Macmilan (1962)

Hudson, R.: IR-System-Engineering, J.Wiley Sons, New York, London, Sydney, Toronto (1969)

Jaacks, R. G.: Auswahl und Optimierung von Filtern für eine Infrarotkamera, Diplomarbeit am AIT (1982)

Jaacks, R. G., Mühlheim, R., Preußner, P.-R.: Cooled Low-Noise Trans-Impedance Amplifier for Infrared Detectors, Infrared Phys. 22, 309 (1982)

Jaacks, R.G.: Dissertation (1986)

Jaacks R.G.: Programm "NEP"

Kazanskii, A.G., Richards, P.L., Haller, E.E.: Appl. Phys. Lett. 31, 496, (1977)

Keyes, R. J., Ed.: Optical and Infrared Detectors, Springer, Berlin Heidelberg, New York (1977)

Krabbe, A., Hausecker, K., Lemke, D., Proetel, K.: An Improved Chopping Secondary Design, Proc. of the Second ESO Infrared Workshop, Garching (1982)

Kruse,P.W., McGlauchlin,L.D., McQuistan,R.B.: Elements of Infrared Technology, John Wiley Sons, inc., New York - London

Lemke, D., Proetel, K.: GIRL (Ringberg-Bericht), MPIA Heidelberg (1982)

Levinstein, H., Mudar, J.: Proceedings of the IEEE Vol.63 No.1 (1975)

Manno, V., Ring, J.: IR-Detection Techniques for Space Researsh

D.Reidel Publishing Company Dodrecht-Holand. Vol.30

Mühlheim, R., Preußner P.R: Kurzbeschreibung IR-Kamera (1983)

Norton, P.: J.Appl. Phys. 47, 308, (1976)

Preußner, P.-R., Mühlheim, R., Grewing, M.: GIRL-Experiment E1:
Infrarot-Kamera für den 3 - 120µm Bereich,
Dokumentation am AIT (1980)

Preußner, P. R., Mühlheim, R., Grewing, M.: Entwicklung und Bau
einer Infrarot-Kamera für den Einsatz auf dem
Space-Shuttle-Experiment
GIRL, Mitt. Astron. Ges. 54, 204 (1981)

Preußner, P.-R., Mühlheim, R., Jaacks, R. G., Grewing, M.: IR-Camera
for GIRL,
Proc. of the Second ESO Infrared Workshop, Garching (1982)

Preußner, P.R.: Programm "Plank"

Pribil, G.: Theoretisches Modell über das zeitliche Verhalten einer
Infrarot-Eichquelle, Zulassungsarbeit am AIT (1980)

Price, R.P., Walker, S.P.: Report No.AFGL-Tr-76-0208 (1976)

Rieger, J.: Private Mitteilungen (1984)

Rieger, J.: New Type of Mini-Spektrometer for IR-Spektral-Range
Private Mitteilungen (1984)

Riedinger, J.: Digitale Signalaufbereitung im Photopolarimeter auf GIRL,
Dissertation an der Universität Heidelberg (1982)

Siegel, R., Howell, J. R.: Thermal Radiation Heat Transfer,
McGraw-Hill,(1972)

Stumpf, H., Rieckers, A.: Therodynamik, Vieweg, Band 1, (1976)

Teichmann, H.: Halbleiter, BI (1969)

Tietze, U., Schenk, Ch.: Halbleiterschaltungstechnik, Springer (1980)

Willardson, R. K., Beer, A. C. (editors): Infrared Detectors II,
Academic Press (1977)

Wolf,J.: Untersuchungen an hochempfindlichen Infrarotdetektoren für das flüssighelium-gekühlte Weltraumteleskop GIRL, Diplomarbeit am MPIA Heidelberg (1981)

Wyatt, C. L., Baker, D. J., Frodsham, D. G.: A Direct Coupled Low Noise Preamplifier for Cryogenically Cooled Photoconductive i. r. Detectors, Infrared Phys. 14, 165 (1974)

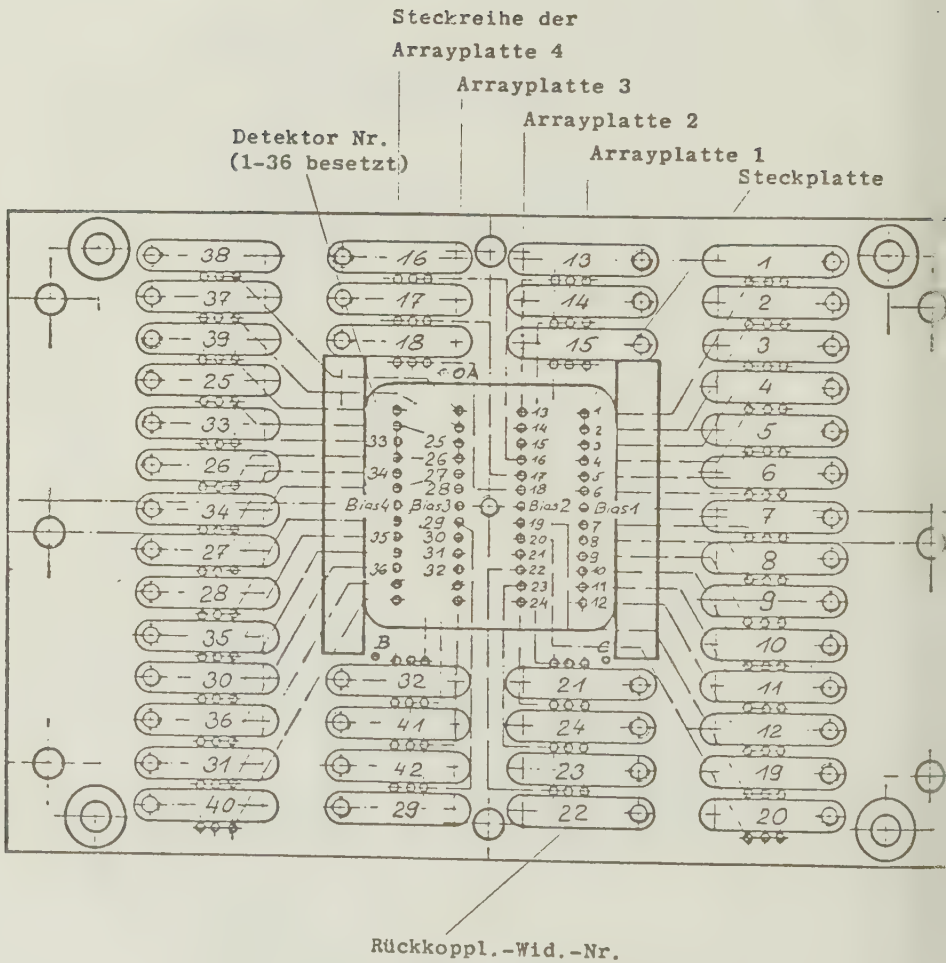
Zeiss, Sonderdruck aus der Zeiss Information, Ein gekühltes Teleskop für das Infrarot-Observatorium GIRL

Abkürzungen

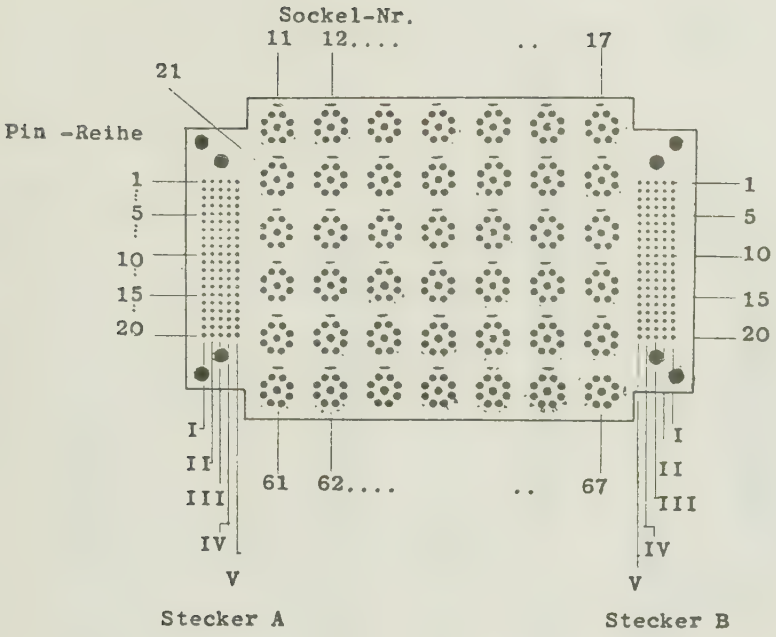
A - bestrahlte Detektorfläche
a - Querschnittsfläche eines Körpers
a+ - Detektordicke
AIT - Astronomisches Institut Tübingen
AR - Antireflexionsbeschichtung
b - Detektorbreite
BBAR - Breitbandantireflexionsbeschichtung
c - Lichtgeschwindigkeit c = 299 792 456 m/s
CdSe - Cadmiumselenid
CdTe - Cadmiumtelurid
D - Detectivity
D' - Spiegeldurchmesser
d - Saphirdicke
d' - Versetzungsschrittweite
e - Elementarladung e = 1,602 x 10^{-19} C
Eg - Bandabstand in reinem Halbleiter
Ei - Störstellen-Bandabstand
F - strahlende Fläche eines Schwarzen Körpers
f - Modulationsfrequenz
Δf - Bandbreite
Fm - Choppermodulationsfaktor
F' - Reduzierfaktor
G - Gain (Photonenleistungsverstärkung)
g - Kontaktbahnlänge
GaAs - Galliumarsenid
Ge:Be - berilliumdotiertes Germanium
Ge:Ga - galliumdotiertes Germanium
h - Plancksches Wirkungsquantum h = 6,626176 x 10^{-34} Js
h+ - Kontaktbahnlänge
h' - Detektorhöhe
H_{bb} - Strahlungsfluß eines Schwarzen Körpers
i_R - Rauschstrom
IR - Infrarot
j - Saphirlänge
k - Boltzmann-Konstante k = 1,380662 x 10^{-23} J/K
K - Konstante
l - Detektorlänge
Δl - Längenänderung
LHe - Flüssig-Helium
LN_2 - Flüssig-Stickstoff
NEP - Noise-Equivalent-Power

P_{bb} - vom Schwarzen Körper abgestrahlte Leistung
P_{RAD} - am Detektor ankommende Leistung
P_{RMS} - vom Detektor verarbeitete Leistung
$P(\lambda)$ - Planckfunktion
P - Wärmestrahlung vom Vorverstärkerblock
r - Radius der Austrittsblende eines Schwarzen Körpers
R - Abstand Austrittsblende-Detektorblende
R^* - Stromempfindlichkeit
R' - el.Widerstand
r_B - Radius eines zentralen Beugungsscheibchens
R_D - Detektorwiderstand
R_L - Ladewiderstand, Rückkopplungswiderstand
$r(\lambda)$ - spektrale Empfindlichkeit eines Detektors
SK - Schwarzer Körper
Si:Ga - galliumdotiertes Silizium
Si:P - phosphordotiertes Silizium
T - Temperatur
TIA - Transimpedanzwandler
U_R - Rauschspannung
U_S - Signalspannung
x - Konstante
y - Konstante
ε - Emissivität
λ - Wellenlänge des Lichts
λ_c - cut-on-Wellenlänge
λ_{max} - Wellenlänge des Lichts bei der die abgestrahlte Leistung eines Schwarzen Körpers das Maximum annimt
λ_i - Wellenlänge der eingestrahlten Strahlung
λ^* - Wärmeleitfähigkeit
η - Quantenwirkungsgrad
ν - Frequenz des Lichts
σ - Stefan-Boltzmann-Konstante = $5{,}7 \times 10^8$ W/m^2K^4

ANHANG



Belegungsplan-Trägerplatte



Verdrahtungsplan (Vorverstärkerblock)

Stecker A

Pin-Reihe 1-5 u. 8-20			Pin-Reihe 6	Pin-Reihe 7
I	Heizlitze u. V+	gelb	Heizung	Heizung
II	V-	orange	Heizung	Heizung
III	Bias	blau	Heizung	Heizung
IV	Masse	rot	Diode-Masse	Diode
V	Signal	weiß		Diode

Stecker B

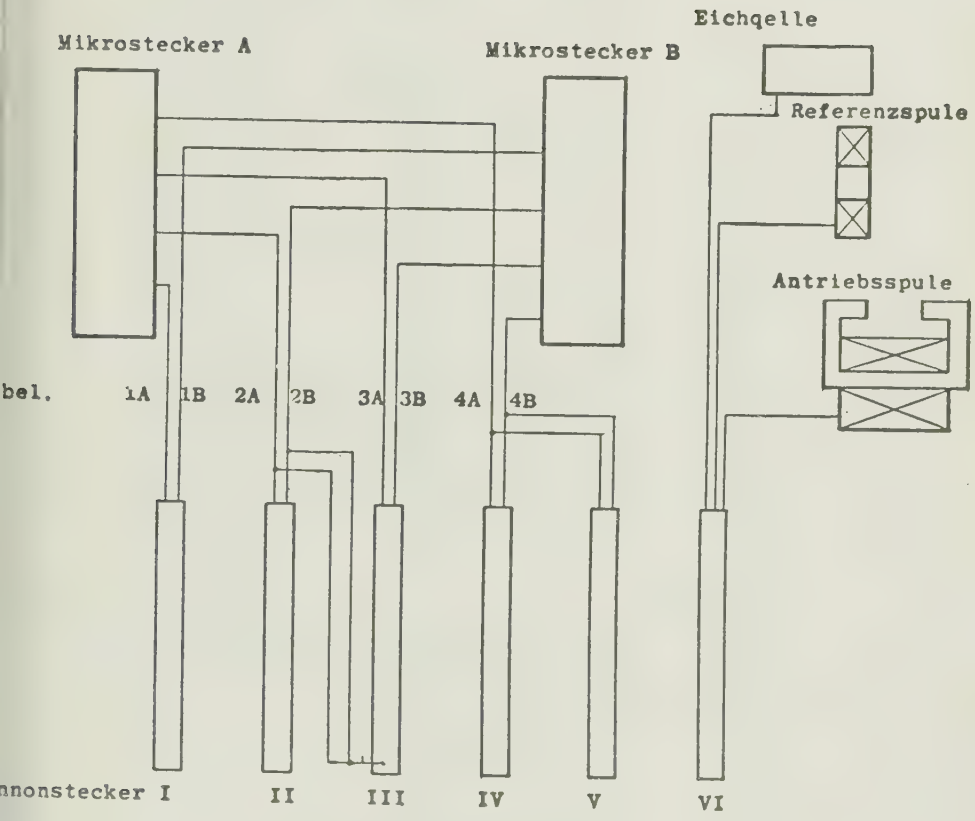
Pin-Reihe 1-13 u. 16-20			Pin-Reihe 14	Pin-Reihe 15
I	Heizlitze u. V+	gelb	Heizung	Heizung
II	V	grün	Heizung	Heizung
III	Bias	schwarz	Heizung	Heizung
IV	Masse	braun	Diode	Diode-Masse
V	Signal	gelb	Diode	

Stecker A

Pin-Reihe	Detektorkr.-Nr.	Sockel-Nr.
1	36	21
2	31	12
3	29	13
4	35	31
5	30	22
6		
7		
8	32	23
9	28	32
10	27	33
11	33	42
12	34	43
13	24	44
14	26	41
15	15	55
16	18	53
17	17	54
18	25	51
19	14	64
20	16	63

Stecker B

1	22	15
2	19	16
3	20	17
4	9	37
5	21	25
6	11	26
7	12	27
8	23	34
9	8	35
10	10	36
11	5	45
12	6	46
13	7	47
14		
15		
16	3	56
17	4	57
18	13	65
19	1	66
20	2	67



Verdrahtungsplan Cannonstecker-Microstecker

(Eichquelle, Referenzspule, Antriebsspule)

Verdrahtungsplan Cannonstecker-Mikrostecker

Cannonstecker	Pin-Nr. Cannonst.	Det.-Kreis
I	1-36	1-36 Signal
	37 frei	
II	1.2	1-12 Bias
	3.4	13-24 Bias
	5.6	25-32 Bias
	7.8	33-36 Bias
	9-36 Reserve	
	37 frei	
III	1-36	1-36 V-
	37	1-36 Masse
IV	1-36	1-36 V+
	37 frei	
V	1-6	Heizung
	7-9	Temperaturdiode
	10-37 frei	
VI	1.2	Eichquelle
	3.4	Referenzspule
	5.6	Antriebsspule
	7-36 frei	

Kabel (27-adrig)	
1A, 1B	Signal (18 Leitungen)
2A, 2B	Bias (18 Leitungen)
	Masse (9 Leitungen)
3A, 3B	V- (18 Leitungen)
	Masse (9 Leitungen)
4A, 4B	V+ (18 Leitungen)
	Heizung (6 Leitungen)
	Temperaturdiode (3 Leitungen)

Stückliste zu E1
(Infrarot-Kamera)

Pos.	Bezeichnung	Zeichng.Nr.	Bl.	Stz.	Material
	Kameramontierung in Y^+,X^+ Ebene	E1-001-1	1		
	Kameramontierung in Z^+,X^+ Ebene	E1-001-2	2		
	Kamera-Schnitt in Y^+,X^+ Ebene	E1-001-3	3		
	Kamera-Schnitt in Z^+,X^+ Ebene	E1-001-4	4		
	Kamera-Aufsicht in Y,Z Ebene	E1-001-5	5		
	Fokalebene	E1-001-6	6		
	Klemmkontakt	E1-001-7			
	Vorverstärker-block-Aufhängung	E1-001-8	8		
1	Flansch	E1-001-9	9	1	Cu
2	Trägerplatte	E1-001-10	10	1	Cu
3	Platte	E1-001-11	11	1	Cu
4	Zwischenplatte	E1-001-12	12	1	Cu
5	Gehäusemantel	E1-001-13	12	1	V2A/Cu
6	Vorverstärkerblock	E1-001-14	13	1	Teflon
7	Abdeckplatte	E1-001-15	14	1	Teflon
8	Kabeldurchführung	E1-001-16	15	2	Al
9	Heizer	E1-001-17	15	2	Cu
10	Bodenplatte 1	E1-001-18	16	1	Al
11	Bodenplatte 2	E1-001-19	16	1	Al
12	Mikrostecker	E1-001-20	17	2	Teflon
13	Abdeckplatte für Mikrostecker	E1-001-21	17	2	Teflon
14					
15	Gewindestange	E1-001-22	18	4	V2A
16	Distanzbuchse 1	E1-001-23	18	4	V2A
17	Distanzbuchse 2	E1-001-24	19	8	GFK

Stückliste zu E1
(Infrarot-Kamera)

Pos.	Bezeichnung	Zeichng.Nr.	Bl.	Stz.	Material
18	Stiftschraube M3	E1-001-25	19	4	V2A
19	Scheibe	E1-001-26	19	8	Cu
20	Scheibe	E1-001-27	19	8	GFK
21					
22	Wid.-Halterung	E1-001-28	20	42	Cu/Saph.
23	Steckplatte	E1-001-29	20	1	Teflon
24	Blendenblech 1	E1-001-30	21	2	Cu
25	Arraygrundplatte 1	E1-001-31	21	2	Cu
26	Blendenblech 2	E1-001-32	22	1	Cu
27	Arraygrundplatte 2	E1-001-33	22	1	Cu
28	Blendenblech 3	E1-001-34	23	1	Cu
29	Arraygrundplatte 3	E1-001-35	23	1	Cu
30	V2A-Bügel 1	E1-001-36	24	2	V2A
31	Arraystecker	E1-001-37	24	4	Teflon
32	V2A-Bügel 2	E1-001-38	25	1	V2A
33	V2A-Bügel 3	E1-001-39	25	1	V2A
34	Mutter M2,8	E1-001-40	26	2	V2A
35	Stiftschrauben M2,8	E1-001-41	26	2	V2A
36	Distanzbuchse 1	E1-001-42	27	6	GFK
37	Senkschraube M3	E1-001-43	27	24	V2A
38	Distanzbuchse 2	E1-001-44	27	2	GFK
39	Distanzbuchse 3	E1-001-45	27	2	GFK
40	Gewindebuchse	E1-001-46	28	4	V2A
41	Abdrückschr. M2	E1-001-47	28	4	V2A
42	Gewindebuchse M2	E1-001-48	28	12	V2A
43	Gewindebuchse M1,7	E1-001-49	28	4	V2A
44					
45					

Stückliste zu E1
(Infrarot-Kamera)

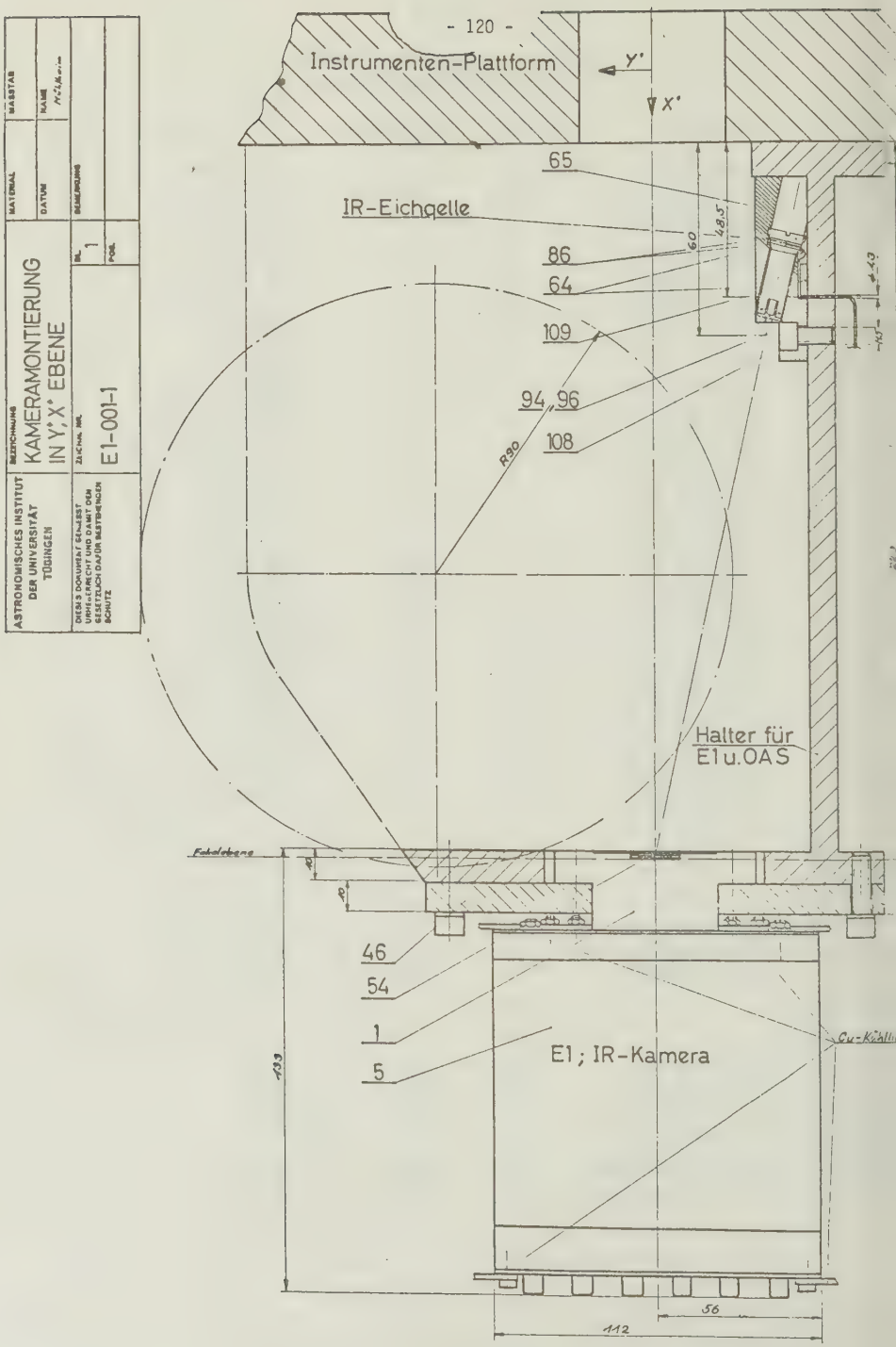
Pos.	Bezeichnung	Zeichng.Nr.	Bl.	Stz.	Material
46	Choppergehäuse	E1-001-50	29	1	Al
47	Befest.-Buchse	E1-001-51	30	2	Mess.
48	Choppergestänge	E1-001-52	30	1	V2A/Cu/Mess.
49	Antriebsspule	E1-001-53	31	1	Tefl/Cu/
50	Referenzspule	E1-001-54	31	1	Tefl/Cu
51	Obere Abdeckplatte	E1-001-55	32	1	Al
52	Abdeckplatte für Spulenraum	E1-001-56	32	1	Al
53	Chopperblatt-abdeckung	E1-001-57	33	1	Al
54	Chopperblatt	E1-001-58	33	1	Al/Cu
55	Chopperstecker	E1-001-59	34	1	Teflon
56	Chopperanschlag	E1-001-60	34	1	Al/V2A/Tefl.
57	Druckplatte	E1-001-61	35	1	Al
58	Steckergehäuse	E1-001-62	35	1	Al
59	Brücke	E1-001-63	36	1	Al
60	Zwischenplatte	E1-001-64	36	1	Al
61					
62	GFK-Kettenglied	E1-001-65	37	8	GFK
63	Ausgl.-Gewicht	E1-001-66	37	1	Mess.
64	IR-Eichquellengeh.	E1-001-67	38	1	Cu
65	Halterung für IR-Eichquellengeh.	E1-001-68	38	1	Cu
66	Befestigung Kühllitze	E1-001-69	39	1	Cu
67	Kühllitze	E1-001-70	39	1	Cu
68	Kralle	E1-001-71	40	36	Teflon/Manganin
69					
70	Si:Ga Detektor			12	Si:Ga/Saphir
71	Si:P Detektor			12	Si:P/Saphir

Stückliste zu E1
(Infrarot-Kamera)

Pos.	Bezeichnung	Zeichng.Nr.	Bl.	Stz.	Material
72	Ge:Be'Detektor			8	Ge:Be/ Saphir
73	Ge:Ga Detektor			4	Ge:Ga/ Saphir
74					
75	Ge-Filter			12	Ge
76	Ge-Filter			12	Ge
77					
78					
79					
80	Eltec-Resistor			36	
81	OP-Verstärker			36	
82	Permanent-Magnet ø3 x 12 mm			1	
83					
84	Permanent-Magnet ø3 x 4 mm			2	
85					
86	Saphirscheibe ø10 x 0,5 mm			2	
87					
88	Mikrosteckerstift			256	
89	Mikrosteckerbuchse			256	
90	Cannon-Buchsen-Stecker			6	
91	OP-Stecksockel			42	Teflon
92					
93					
94	Manganin-Draht teflonisoliert o0,1mm				Teflon/ Manganin
95	Abgeschirmtes Kabel 27-polig o2 mm				Teflon/ Manganin
96	Teflon-Isolation o1mm				Teflon
97	Teflon-Isolation ø0,5 mm				Teflon
98	Cu-Draht o0.3 mm teflonisoliert				Cu/ Teflon
99	Cu-Draht o0.3 mm				Cu
100					
101					
102					
103					

Stückliste: Normteile
(Infrarot-Kamera)

Pos.	Bezeichnung	Stz.	Material	Norm
104	Schraube M2 x 2,5	42	VA	DIN 84
105	Zyl.Schr.M6 x 12	4	V2A	DIN 912
106	Zyl.Schr.M3 x 12	8	V2A	DIN 912
107	Senkschr.M4 x 12	2	VA	DIN 963
108	Zyl.Schr.M5 x 12	1	V2A	DIN 912
109	Schraube M2 x 4	2	VA	DIN 84
110	Schraube M1,4 x 3	2	VA	DIN 84
111	Senkschr.M2 x 5	20	VA	DIN 963
112	Senkschr.M2 x 12	2	VA	DIN 963
113	Senkschr.M2 x 14	1	VA	DIN 963
114	Schraube M1,4 x 5	2	VA	DIN 84
115	Senkschr.M1,2 x 3	8	VA	DIN 963
116	Senkschr.M1,4 x 2	2	VA	DIN 963
117	Senkschr.M2 x 4	4	VA	DIN 963
118	Schraube M1,2 x 4	4	VA	DIN 84
119	Schraube M2 x 8	2	VA	DIN 84
120	Schraube M2 x 10	4	VA	DIN 84
121	Senkschr.M1,4 x 3	2	VA	DIN 963
122	Madenschr.M1,4 x 3	3	VA	DIN 84
123	Madenschr.M2 x 3	3	V2A	DIN 914
124	Senkschr.M1,4 x 3	8	VA	DIN 963
125	Madenschr.M2 x 5	8	V2A	DIN 914
126	Senkschr.M1,4 x 2,5	28	VA	DIN 963
127	Schraube M3 x 8	1	V2A	DIN 912
128	Schraube M1,7 x 10	12	VA	DIN 84
129	Schraube M2 x 8	4	VA	DIN 84
130	Zyl.Schr.M3 x 17	4	V2A	DIN 912
131	Schraube M2 x 7	10	VA	DIN 84
132	Zyl.Schr.M3 x 10	14	V2A	DIN 84
133	Senkschr.M1,2 x 1	4	VA	DIN 963
134				
135				
136				
137				
138				
139	Federring ø3mm	30	V4A	DIN 127
140	Unterlagssch.ø3mm	8	V4A	DIN 125
141	Federring o6mm	4	V4A	DIN 127
142				
143				
144				
145	Stift ø2 x 16	2	V2A	DIN 7
146	Stift ø2 x 4	10	V2A	DIN 7
147	Stift ø0,5 x 10	4	V2A	DIN 7
148	Stift ø1 x 10	2	V2A	DIN 7
149				
150	Sechskt.-Mutter M3	16	V2A	DIN 934
151	Sechskt.-Mutter M2	6	V2A	DIN 934



ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN

BEZEICHNUNG: KAMERAMONTIERUNG IN Y', X' EBENE

ZEICHN. NR.: E1-001-1

MASSSTAB

DATUM

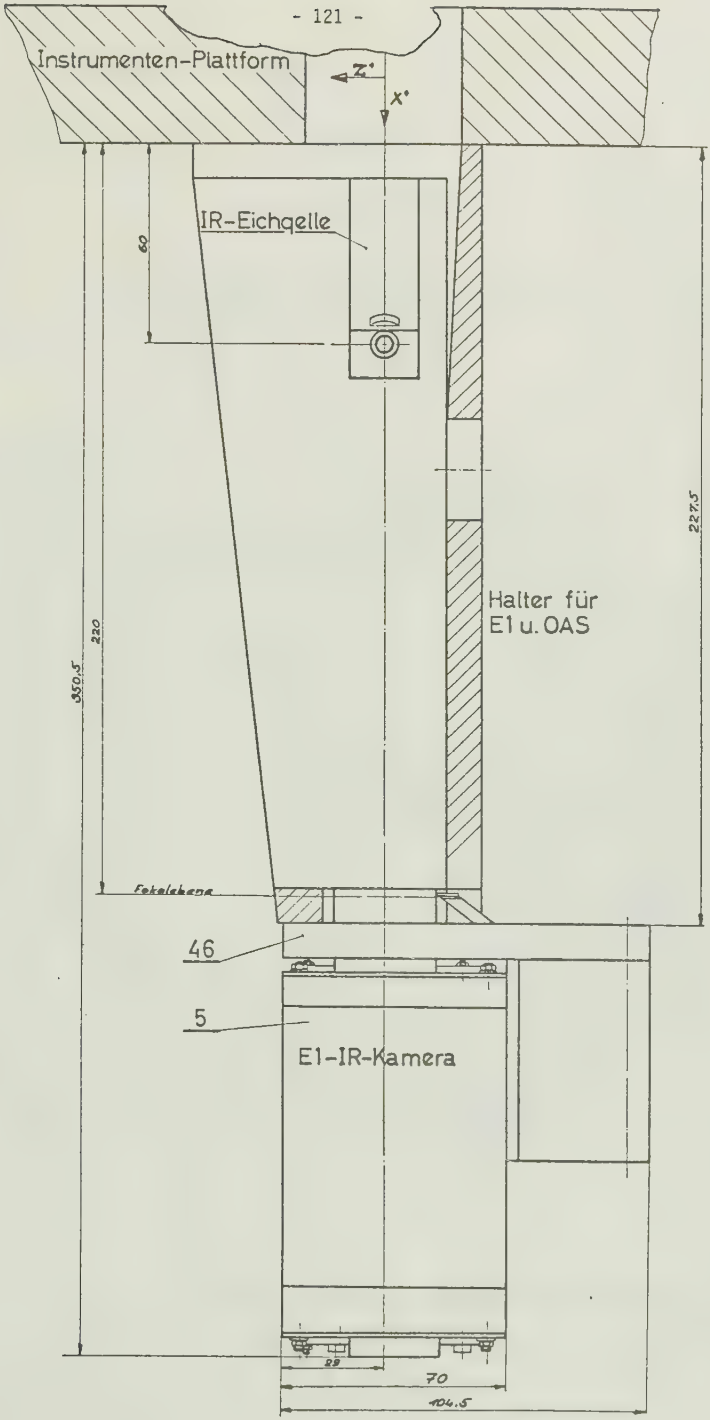
NAME

BEMERKUNG

BL. 1

POS.

DIESES DOKUMENT GEHÖRT UNSERER FIRMA UND DARF OHNE GESETZLICH DAZU BESTIMMTEN SCHUTZ



KAMERAMONTIERUNG IN Z', X' EBENE

DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN

DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ

ZEICHN. NR. E1-001-2

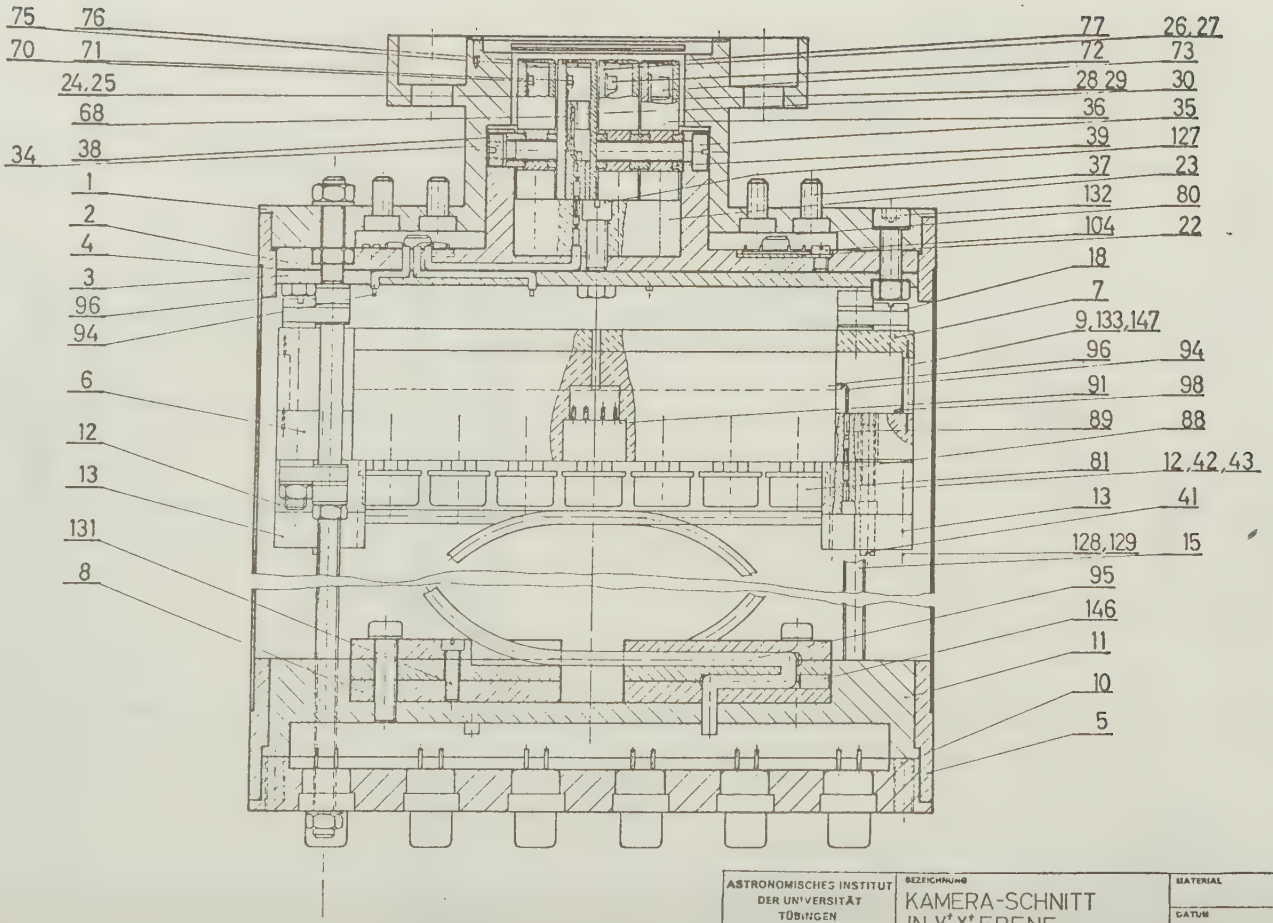
BL. 2

POS.

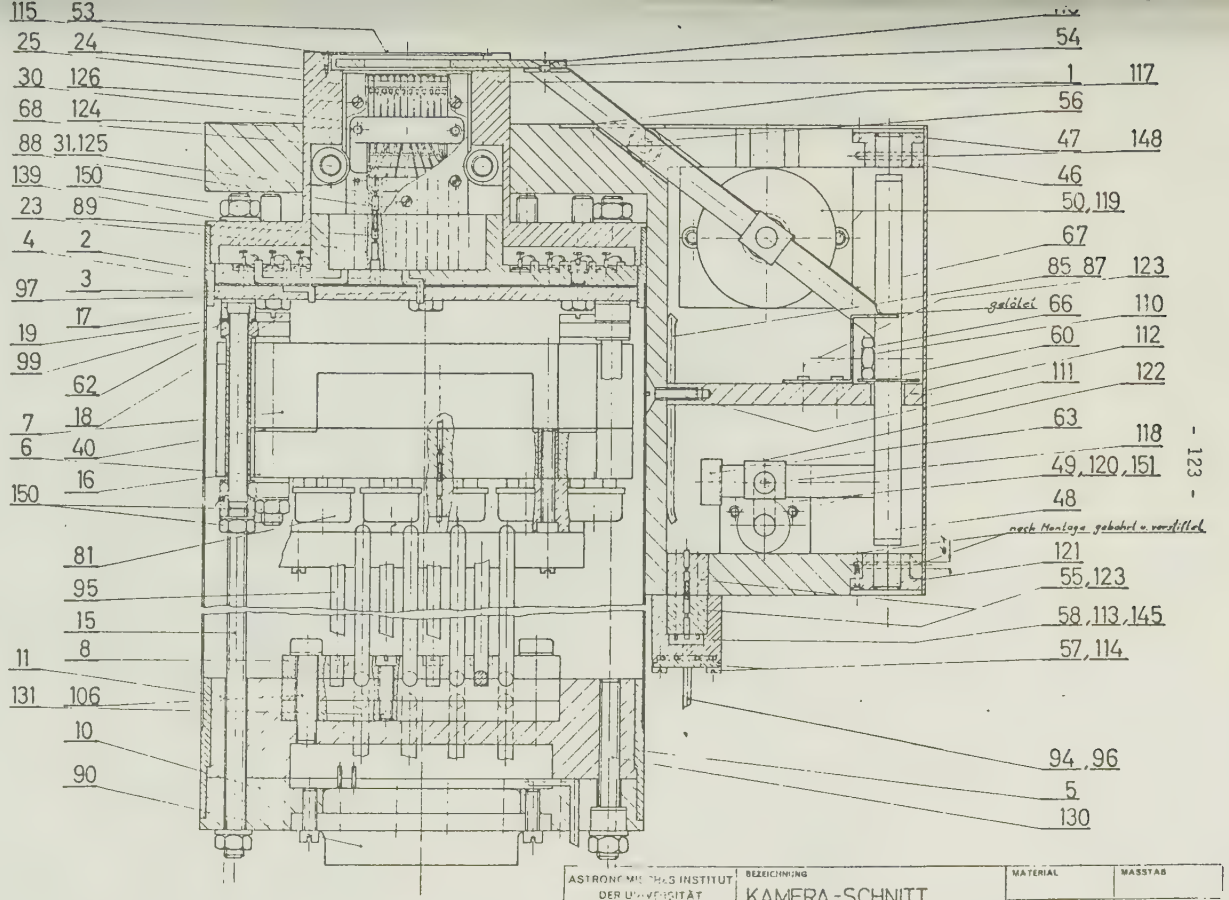
DATUM

BEMERKUNG

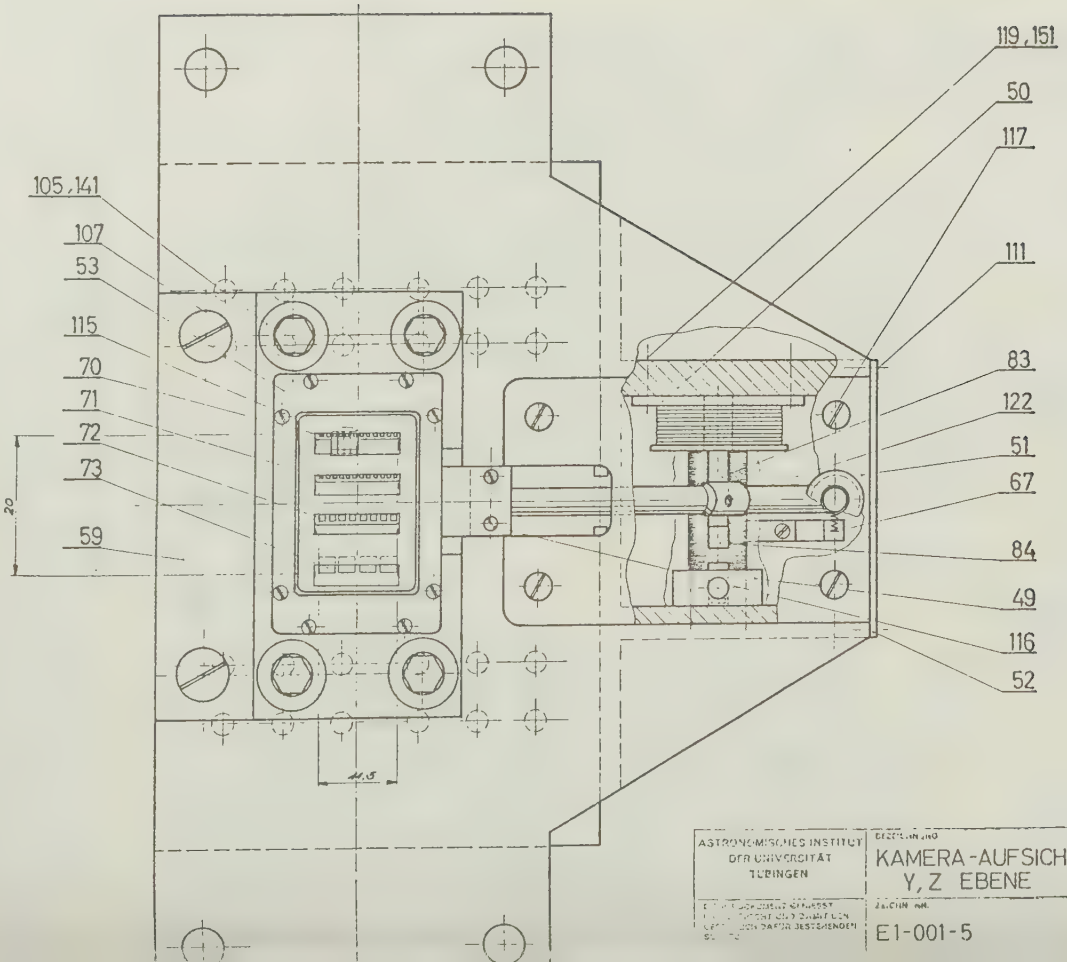
NAME Mühlheim



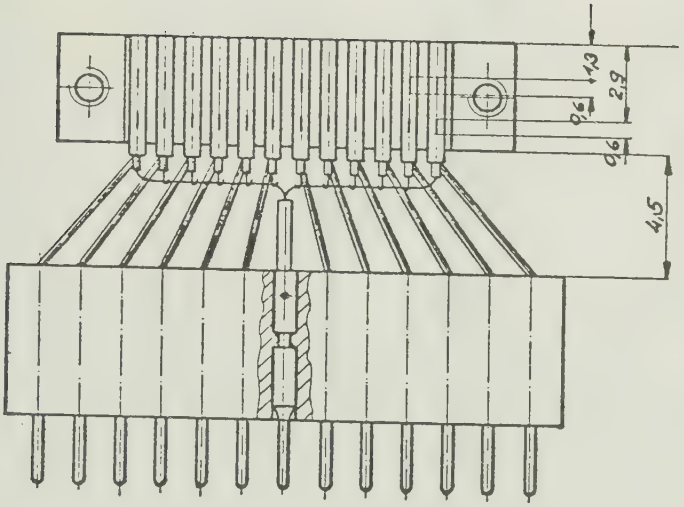
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: KAMERA-SCHNITT IN Y',X' EBENE	MATERIAL	MASSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DARF OHNE	ZEICHN. NR.	BL.	BEMERKUNG



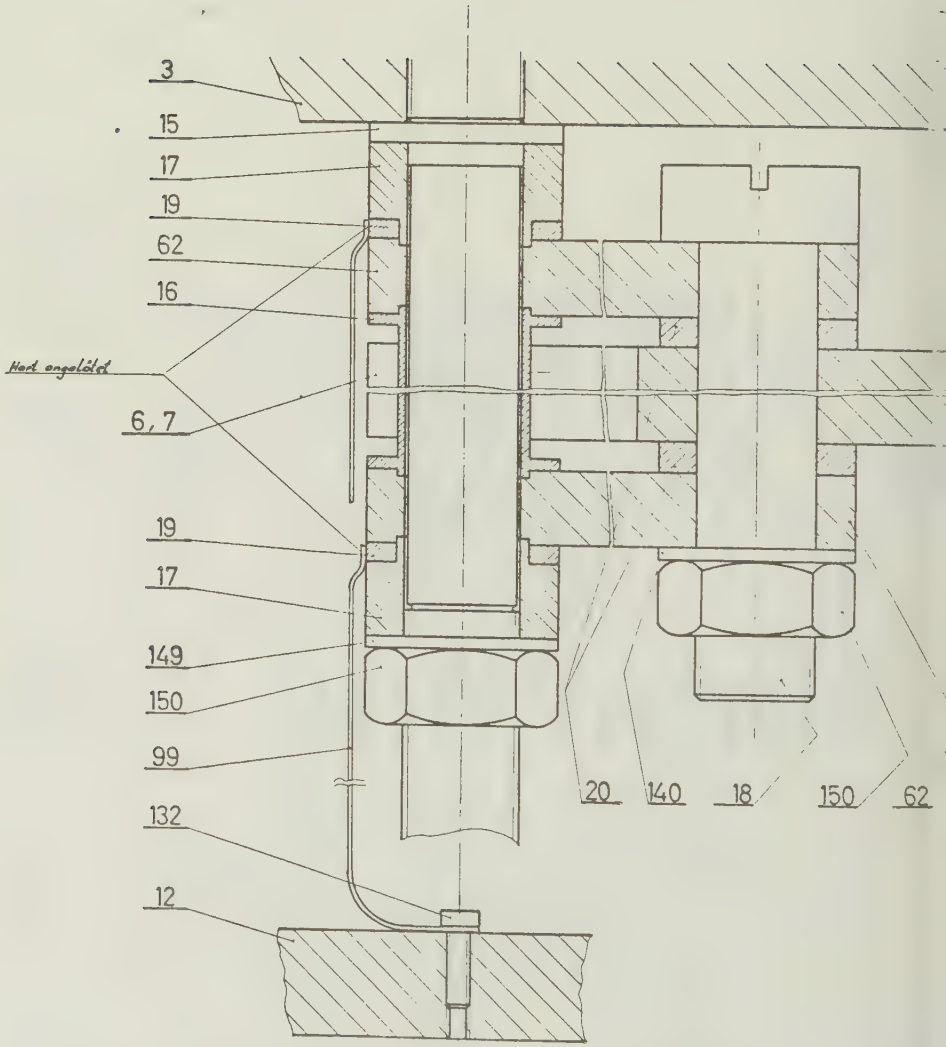
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: KAMERA-SCHNITT IN Z⁺,X⁺EBENE	MATERIAL	MASSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheims
DIESE ZEICHNUNG IST UNSER EIGENTUM UND DARF OHNE UNSERE GENEHMIGUNG WEDER VERVIELFÄLTIGT NOCH DRITTEN MITGETEILT WERDEN	ZEICHN. NR.: F1-001-4	BL. 4 POS.	BEMERKUNG



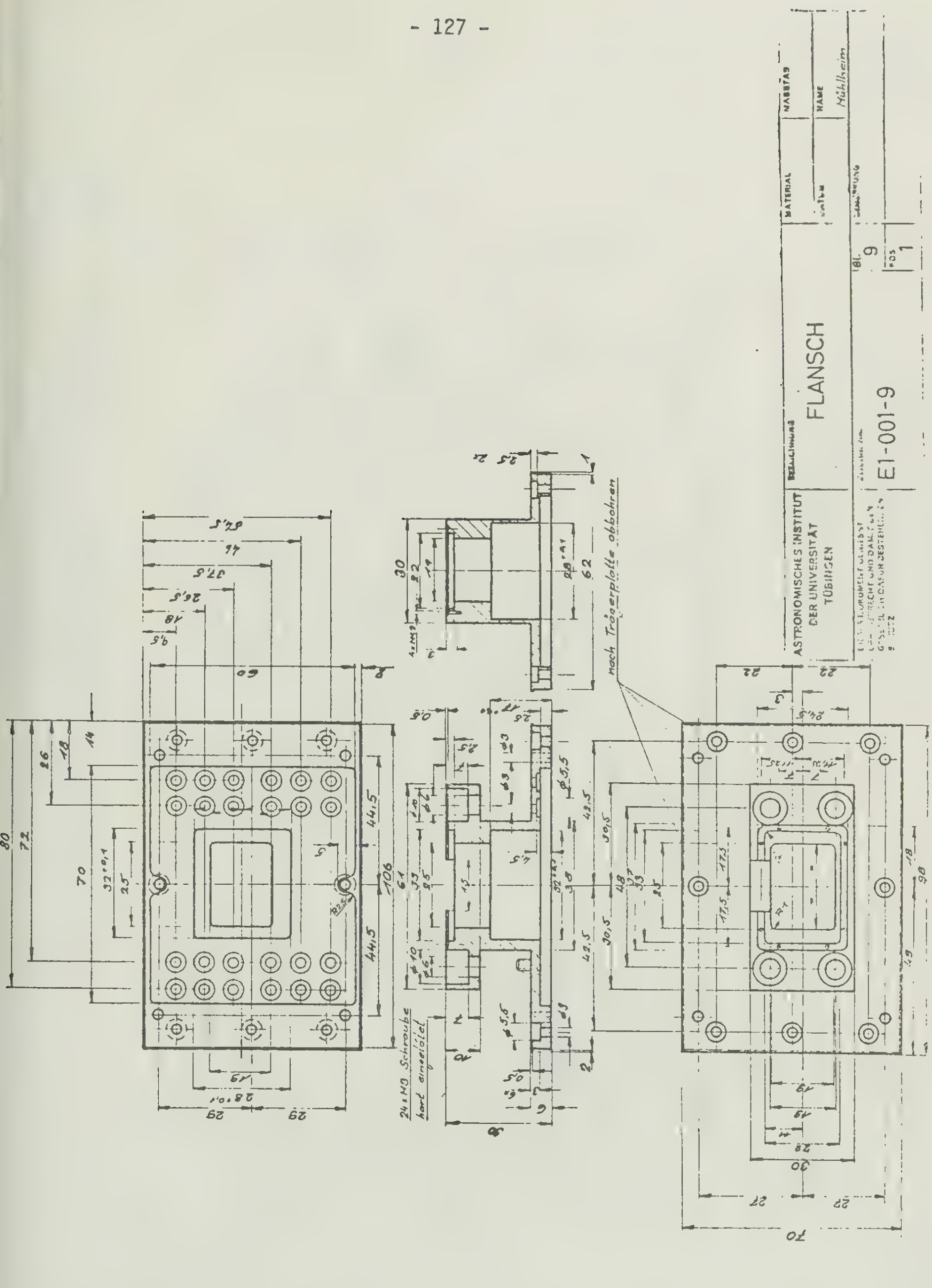
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: KAMERA-AUFSICHT Y,Z EBENE	MATERIAL	MASSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
	ZEICHN. NR.: E1-001-5	BL. 5	ZEICHNUNG

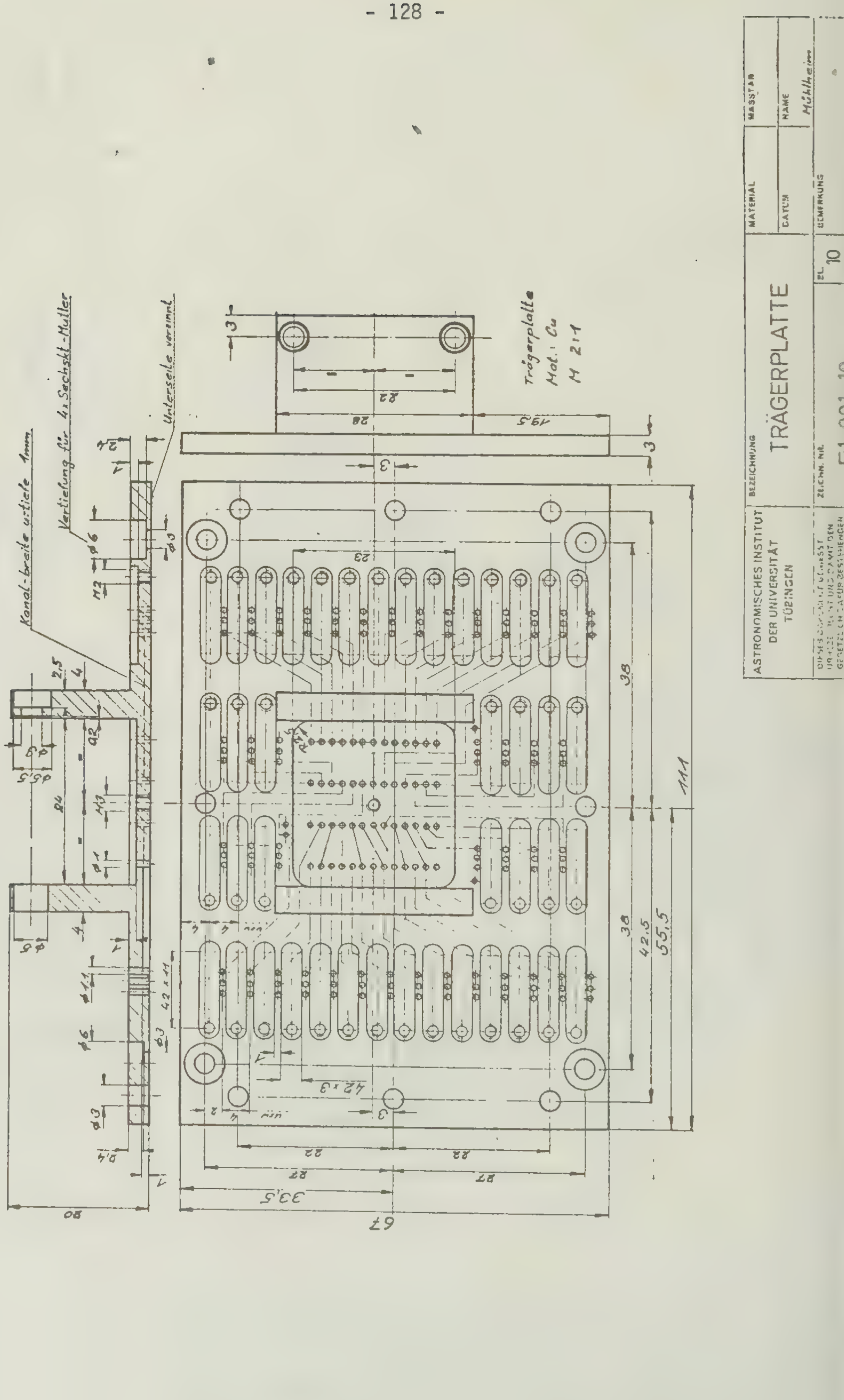


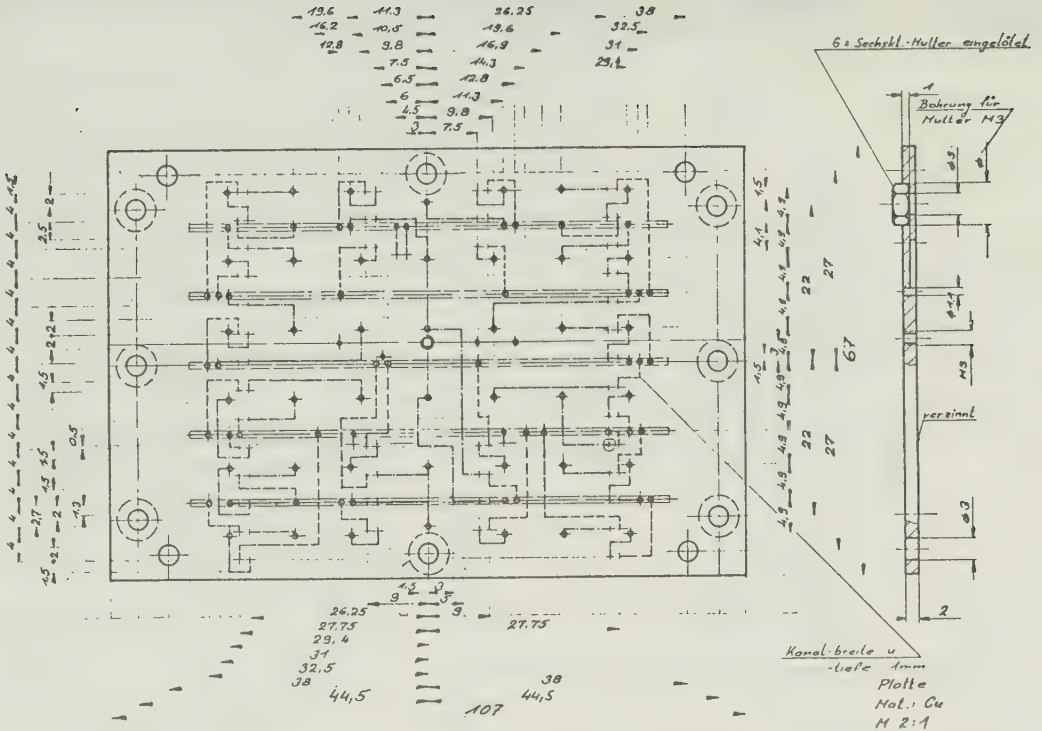
OMISCHES INSTITUT UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG KLEMMKONTAKT	MATERIAL	MASSTAB 5:1
		DATUM	NAME Mühlheim
UMENT GENIESST ECHT UND DAMIT DEN H DAFÜR BESTEHENDEN	ZEICHN. NR. E1-001-7	BL. 7	BEMERKUNG
		POS.	



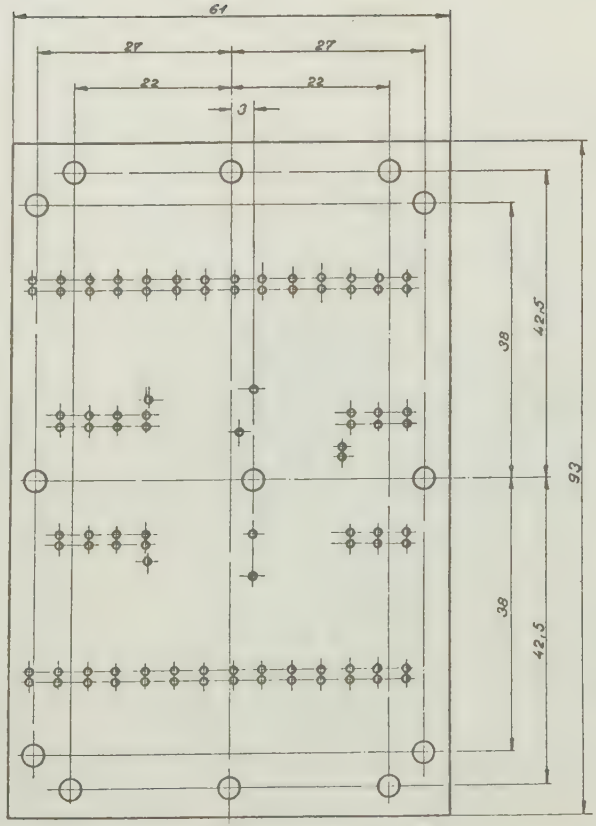
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: VORVERSTÄRKER-AUFHÄNGUNG	MATERIAL	MASSSTAB
		DATUM	NAME: Mühlhe
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR: E1-001-8	BL. 8	BEMERKUNG
		POS.	


ASTRONOMISCHES INSTITUT
DER UNIVERSITÄT
TÜBINGEN
FLANSCH
E1-001-9
MATERIAL
NAME
Mühlheim
nach Trägerplatte abbohren
24 x M3 Schraube
hart eingelötet


ASTRONOMISCHES INSTITUT
DER UNIVERSITÄT
TÜBINGEN
BEZEICHNUNG
TRÄGERPLATTE
MATERIAL
MASSTAB
DATUM
NAME
Mühlheim
BEMERKUNG
ZEICHN. NR.
51-001-10
Trägerplatte
Mat.: Cu
M 2:1
Unterseite versenkt



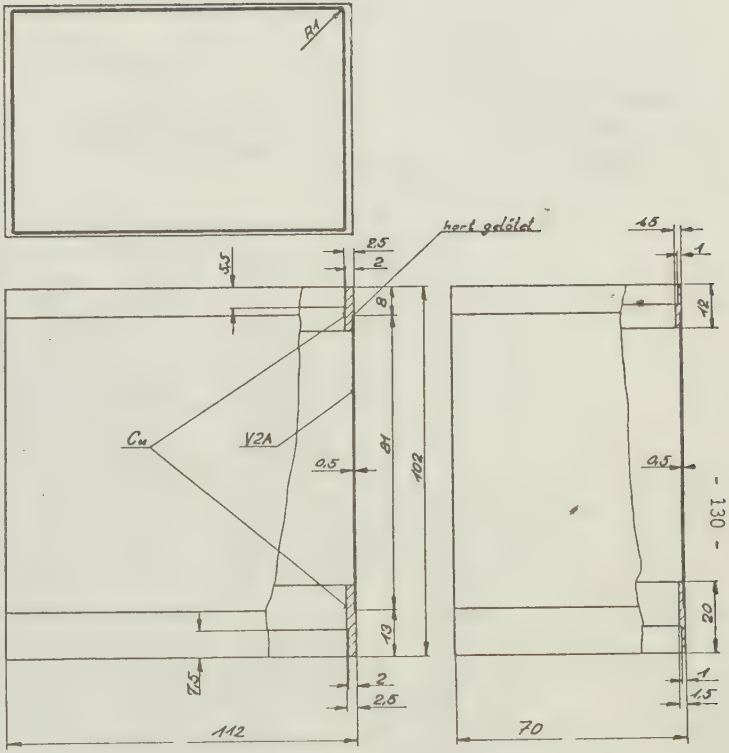
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: PLATTE	MATERIAL: Cu	MASSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-11	BL.: 11	BEMERKUNG
		POS.: 3	



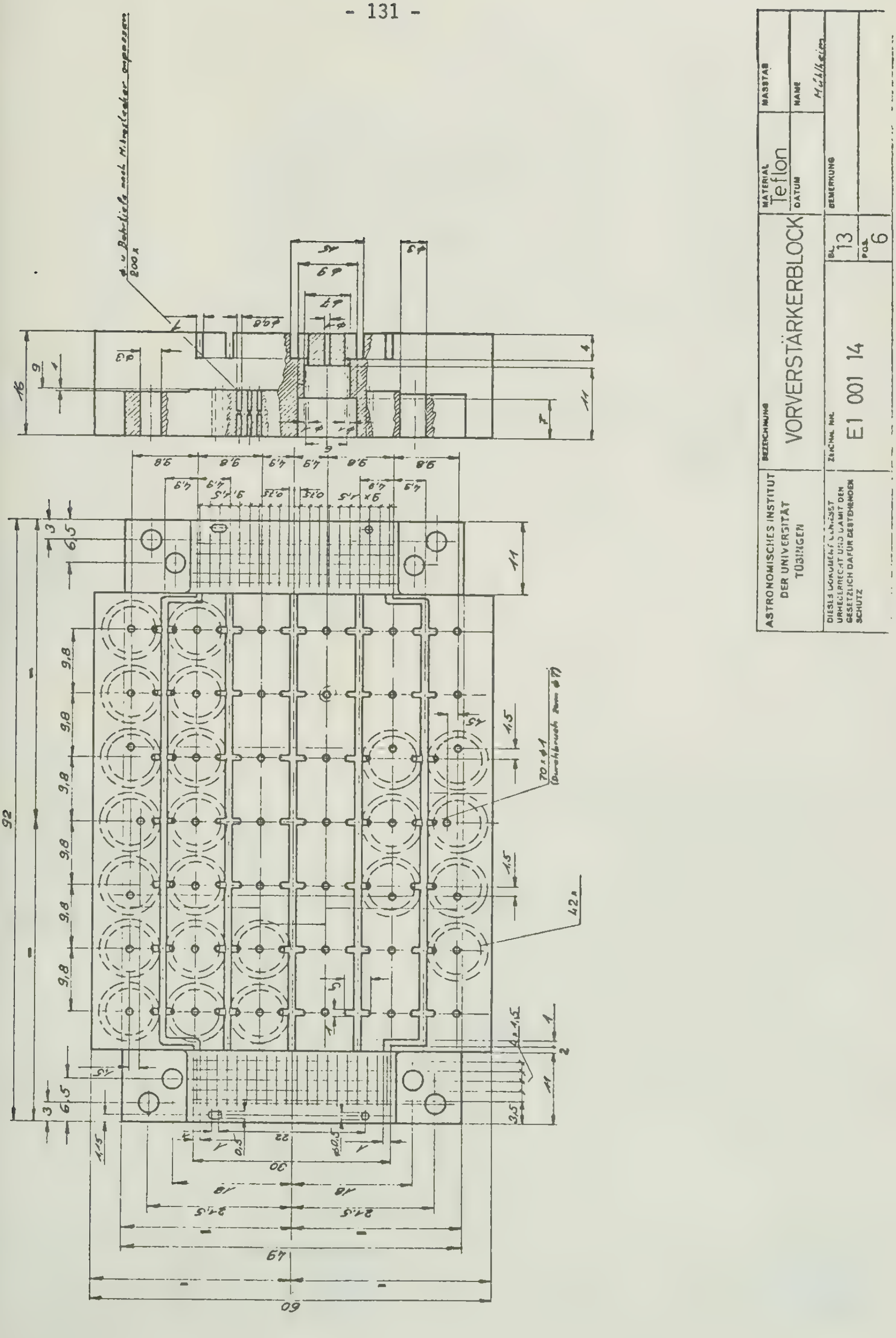
Bohrungen ϕ3 u. ϕ 1,1 nach Trägerplatte gebohrt

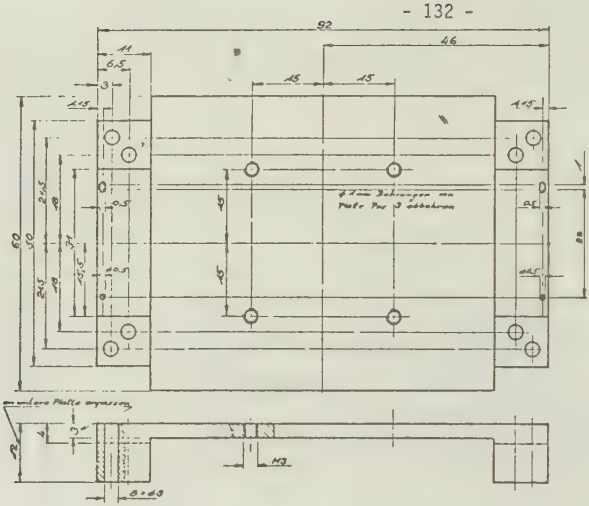
Plattendicke 0,3mm beidseitig versimmt

ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: ZWISCHENPLATTE	MATERIAL: Cu	MASSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim

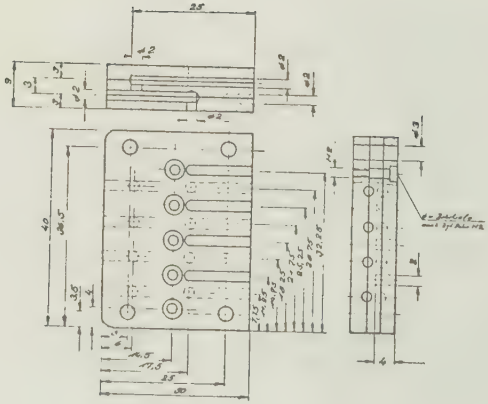


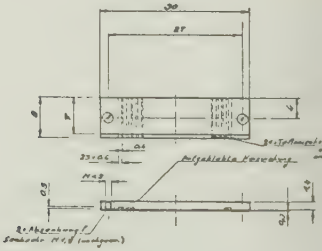
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: GEHÄUSE	MATERIAL: V2A/Cu	MASSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim


ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN
BEZEICHNUNG
VORVERSTÄRKERBLOCK
MATERIAL
Teflon
MASSTAB
DATUM
NAME
BEMERKUNG
ZEICHN. NR.
E1 001 14
BL.
13
POS.
6



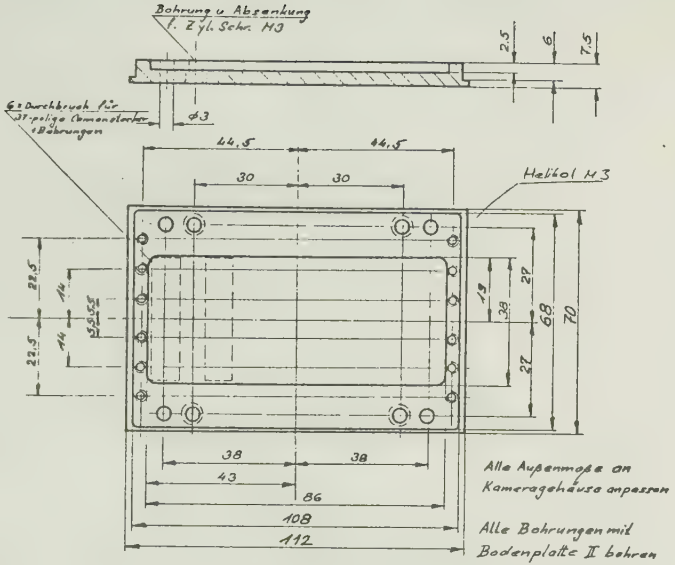
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: ABDECKPLATTE	MATERIAL: Teflon	MASSTAB:
	ZEICHN. NR.: E1-001-15	BL. 14 / BLÄTTER 7	BEMERKUNG:



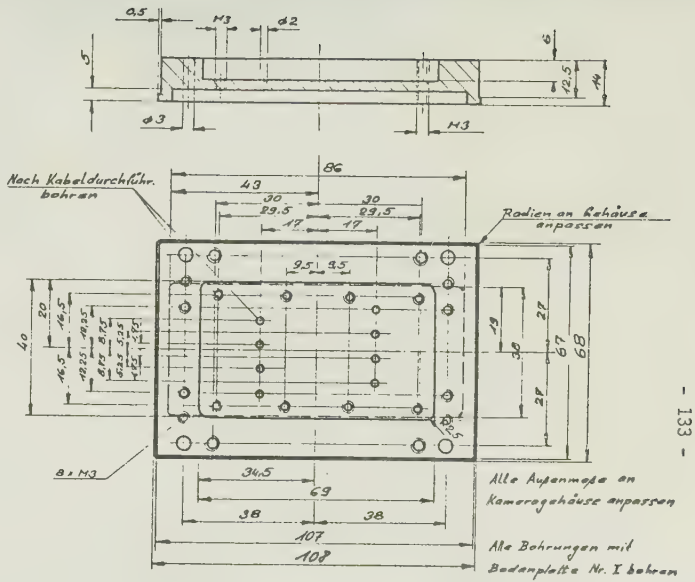


ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: KABELDURCHFÜHRUNG	MATERIAL: Al	MASSTAB:
	ZEICHN. NR.: E1-001-16	BL. 15 / BLÄTTER 8	BEMERKUNG:

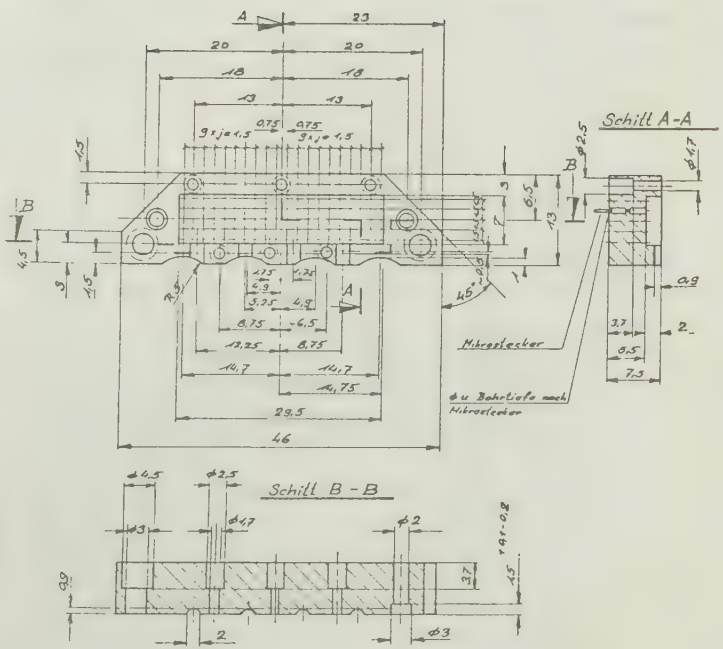
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: HEIZER	MATERIAL: Cu	MASSTAB:
	ZEICHN. NR.: E1-001-17	BL. 15 / BLÄTTER 9	BEMERKUNG:



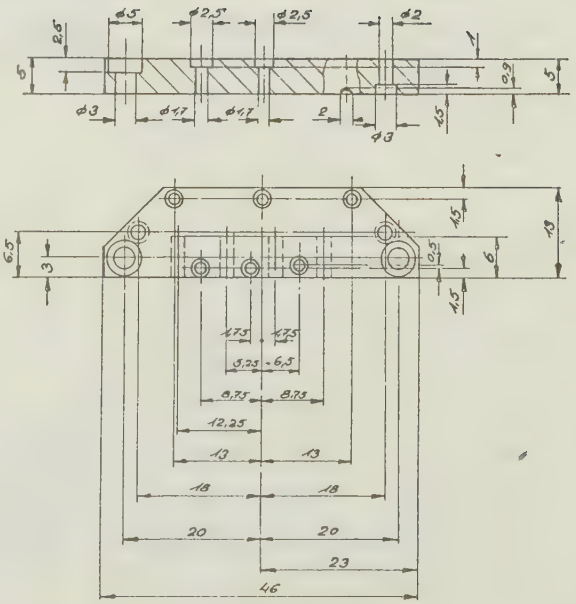
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: BODENPLATTE 1	MATERIAL: Al	
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-18	BL. 16 / BOS. 10	BEMERKUNG



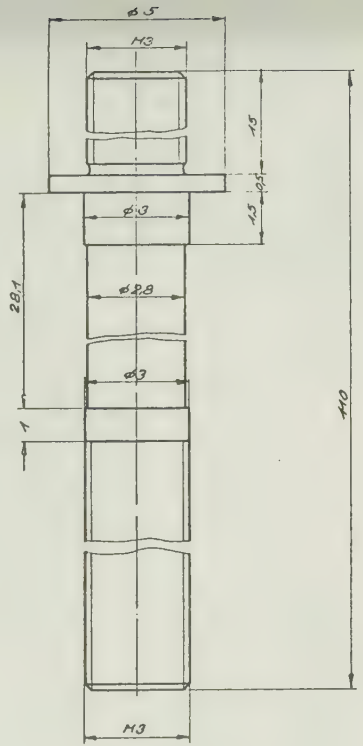
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: BODENPLATTE 2	MATERIAL: Al	M.
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-19	BL. 16 / BOS. 11	BEMERKUNG



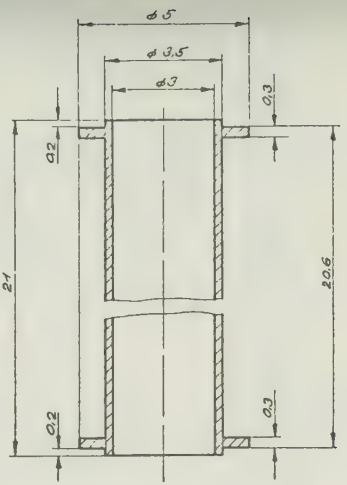
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: MIKROSTECKER	MATERIAL: Teflon	MASSTAB:
		DATUM:	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DARF OHNE GESETZLICH DAZU BESTIMMTEN	ZEICHN. NR.	BL. 17	BEMERKUNG



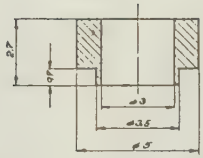
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: ABDECKPLATTE FÜR MIKROSTECKER	MATERIAL: Teflon	MASSTAB:
		DATUM:	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DARF OHNE	ZEICHN. NR.	BL.	BEMERKUNG



ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: GEWINDESTANGE	MATERIAL: V2A	MASSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-22	BL. 18	BEMERKUNG
		POS. 15	

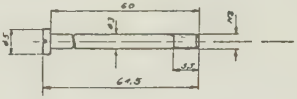


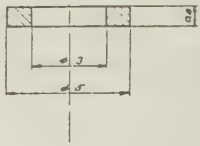
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: DISTANZBUCHSE 1	MATERIAL: V2A	MASSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-23	BL. 18	BEMERKUNG
		POS. 16	



ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	DISTANZBUCHSE 2	MATERIAL GFK	MASSTAB
		DATUM	NAME Mühlberger
DIESES DOKUMENT BEWAHRT UNSERE RECHTE UND DAMIT DER GESETZLICH DAFÜR BESTIMMTEN SCHUTZ	ZEICHN. NR. E1-001-24	BL. 19 POS. 17	BENENNUNG

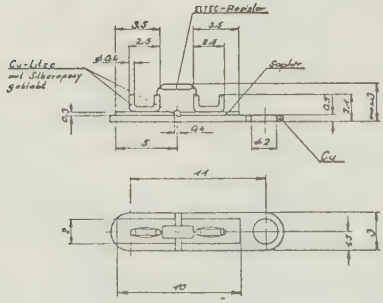
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	SCHEIBE	MATERIAL Cu	MASSTAB
		DATUM	NAME
DIESES DOKUMENT BEWAHRT UNSERE RECHTE UND DAMIT DER GESETZLICH DAFÜR BESTIMMTEN SCHUTZ	ZEICHN. NR. E1-001-26	BL. 19 POS. 19	BENENNUNG

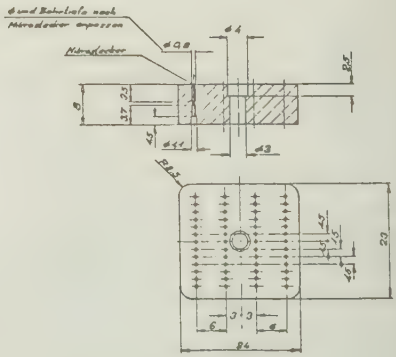




ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	STIFTSCHRAUBE M3	MATERIAL V2A	MASSTAB
		DATUM	NAME Mühlberger
DIESES DOKUMENT BEWAHRT UNSERE RECHTE UND DAMIT DER GESETZLICH DAFÜR BESTIMMTEN SCHUTZ	ZEICHN. NR. E1-001-25	BL. 19 POS. 18	BENENNUNG

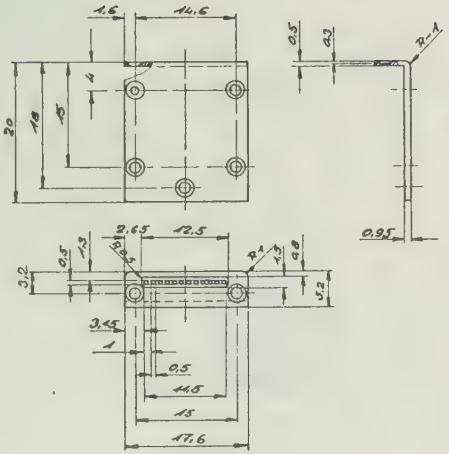
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	SCHEIBE	MATERIAL GFK	MASSTAB
		DATUM	NAME
DIESES DOKUMENT BEWAHRT UNSERE RECHTE UND DAMIT DER GESETZLICH DAFÜR BESTIMMTEN SCHUTZ	ZEICHN. NR. E1-001-27	BL. 19 POS. 20	BENENNUNG



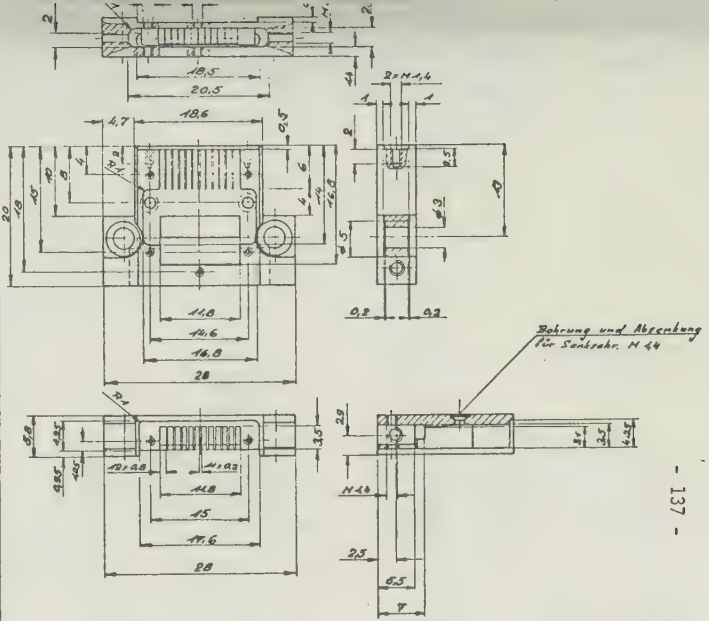


ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	WID-HALTERUNG	MATERIAL Cu/Saph	MASSTAB
		DATUM	NAME Mühlberger
DIESES DOKUMENT BEWAHRT UNSERE RECHTE UND DAMIT DER GESETZLICH DAFÜR BESTIMMTEN SCHUTZ	ZEICHN. NR. E1-001-28	BL. 20 POS. 22	BENENNUNG

ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	STECKPLATTE	MATERIAL Teflon	MASSTAB
		DATUM	NAME Mühlb.
DIESES DOKUMENT BEWAHRT UNSERE RECHTE UND DAMIT DER GESETZLICH DAFÜR BESTIMMTEN SCHUTZ	ZEICHN. NR. E1-001-29	BL. 20 POS. 23	BENENNUNG

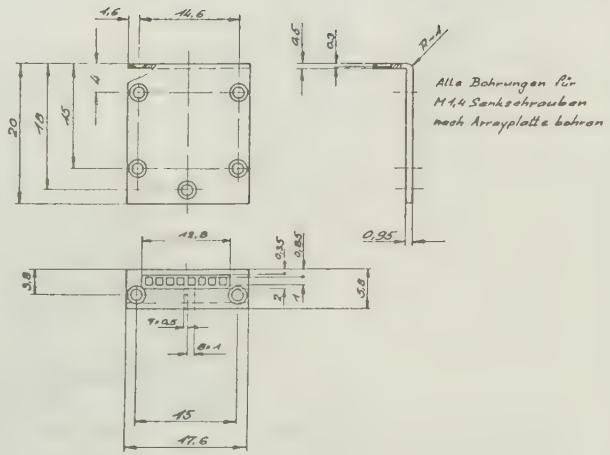


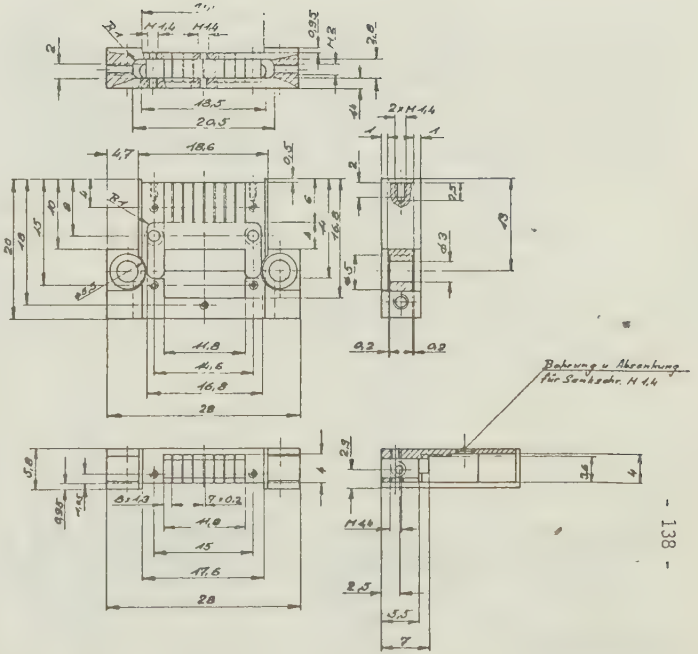
Alle Bohrungen für Schrauben M 1,4 absenken und nach Arrayplatte bohren



ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: BLENDE 1		MATERIAL: Cu	MASSTAB:
			DATUM:	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-30	BL. 21 / POS. 24	BEMERKUNG:	

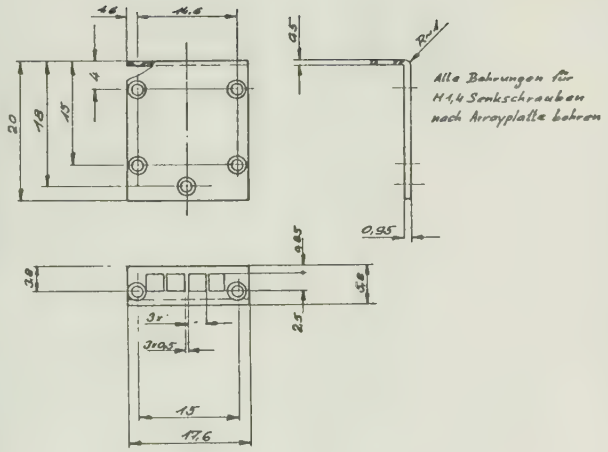
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: ARRAYPLATTE 1		MATERIAL: Cu	MASSTAB:
			DATUM:	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-31	BL. 21 / POS. 25	BEMERKUNG:	

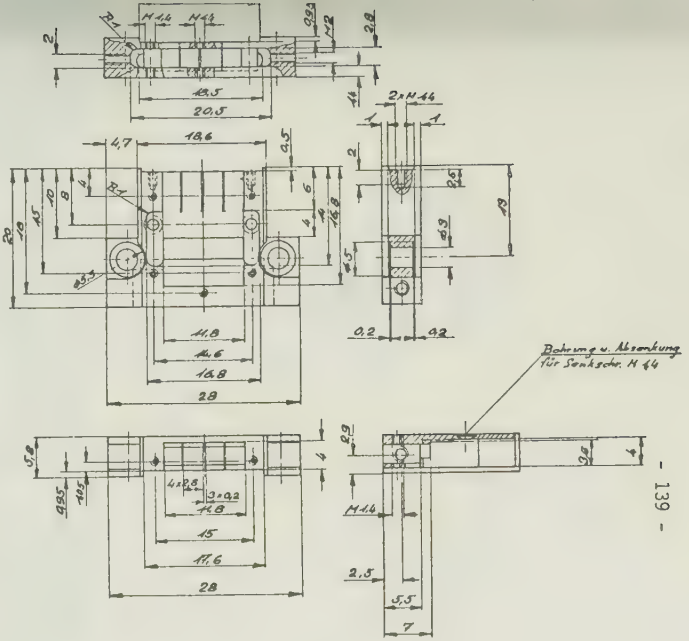




ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: BLENDE 2	MATERIAL: Cu	MASSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-32	BL.: 22	BEMERKUNG

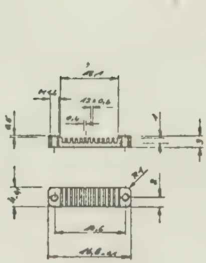
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: ARRAYPLATTE 2	MATERIAL: Cu	MASSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN	ZEICHN. NR.: E1-001-31	BL.: 22	BEMERKUNG





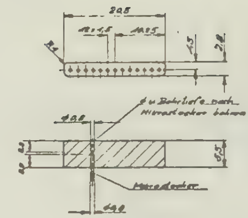
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: BLENDE 3	MATERIAL: Cu	MASSTAB:
		DATUM:	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-34	BL. 23 / POS. 28	BEMERKUNG:

ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: ARRAYPLATTE 3	MATERIAL: Cu	MASSTAB:
		DATUM:	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-35	BL. 23 / POS. 29	BEMERKUNG:

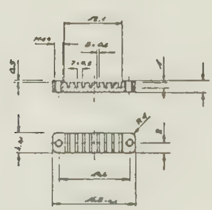


Außenmaße an Arrayplatte anpassen
Gewinde nach Arrayplatte bohren

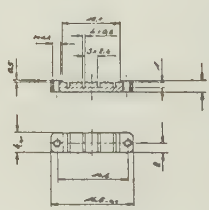
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: V2A-BÜGEL 1		MATERIAL: V2A	MASSSTAB
			DATUM	NAME: Mühlheim
	ZEICHN. NR.: E1-001-36	BL. 24	BENENNUNG	
		POS. 30		



ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: ARRAYSTECKER		MATERIAL: Teflon	MASSSTAB
			DATUM	NAME: Mühl...
	ZEICHN. NR.: E1-001-37	BL. 24	BENENNUNG	
		POS. 31		



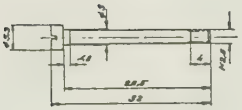
Außenmaße an Arrayplatte anpassen
Gewinde nach Arrayplatte bohren



Außenmaße an Arrayplatte anpassen
Gewinde nach Arrayplatte bohren

ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: V2A-BUGEL 2		MATERIAL: V2A	MASSSTAB
			DATUM	NAME: Mühlheim
	ZEICHN. NR.: E1-001-38	BL. 25	BENENNUNG	
		POS. 32		

ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: V2A-BÜGEL 3		MATERIAL: V2A	MASSSTAB
			DATUM	NAME: Mühlheim
	ZEICHN. NR.: E1-001-39	BL. 25	BENENNUNG	
		POS. 33		

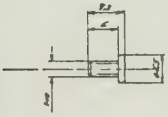


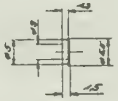
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: MUTTER M2,8	MATERIAL: V2A	MASSTAB:
		DATUM:	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTIMMTEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-40	BL. 26 / PDA. 34	BEMERKUNG:

ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: STIFTSCHRAUBE M2,8	MATERIAL: V2A	MASSTAB:
		DATUM:	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTIMMTEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-41	BL. 26 / PDA. 35	BEMERKUNG:

ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: DISTANZBUCHSE 1	MATERIAL: GFK	MASSTAB:
		DATUM:	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTIMMTEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-42	BL. 27 / PDA. 36	BEMERKUNG:

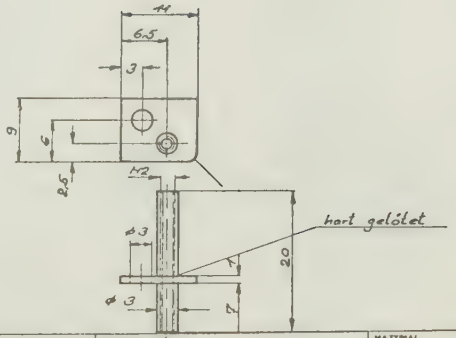
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: DISTANZBUCHSE 2	MATERIAL: GFK	MASSTAB:
		DATUM:	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTIMMTEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-44	BL. 27 / PDA. 38	BEMERKUNG:



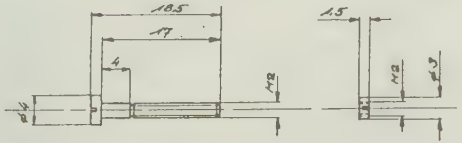


ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: SENKSCHRAUBE M3	MATERIAL: V2A	MASSTAB:
		DATUM:	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTIMMTEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-43	BL. 27 / PDA. 37	BEMERKUNG:

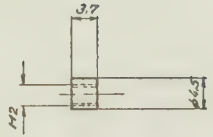
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: DISTANZBUCHSE 3	MATERIAL: GFK	MASSTAB:
		DATUM:	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTIMMTEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-45	BL. 27 / PDA. 39	BEMERKUNG:



ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG	MATERIAL	MASSTAB
	GEWINDEBUCHSE	V2A	
		DATUM	NAME Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR. E1 001 46	BL. 28	BEMERKUNG
		POS. 40	

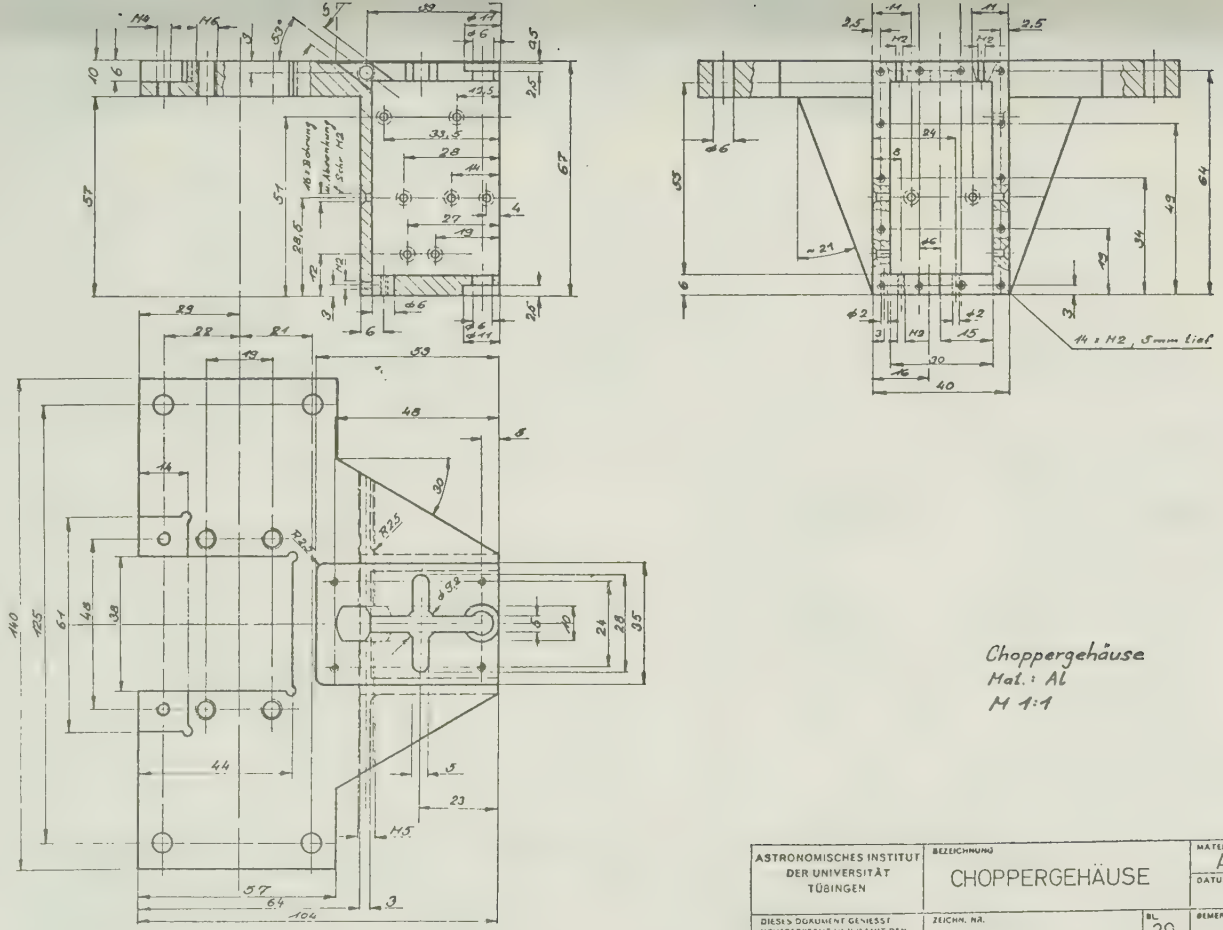


ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG	MATERIAL	MASSTAB
	ABDRÜCKSCHRAUBE + MUTTER M 2	V2A	
		DATUM	NAME Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN	ZEICHN. NR.	BL. 22	BEMERKUNG



ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG	MATERIAL	MASSTAB
	GEWINDEBUCHSE M2	V2A	
		DATUM	NAME Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR. E1 001 48	BL. 28	BEMERKUNG
		POS. 42	

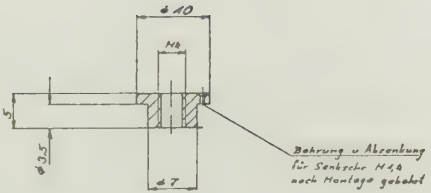
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG	MATERIAL	MASSTAB
	GEWINDEBUCHSE M1,7	V2A	
		DATUM	NAME Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST	ZEICHN. NR.	BL.	BEMERKUNG

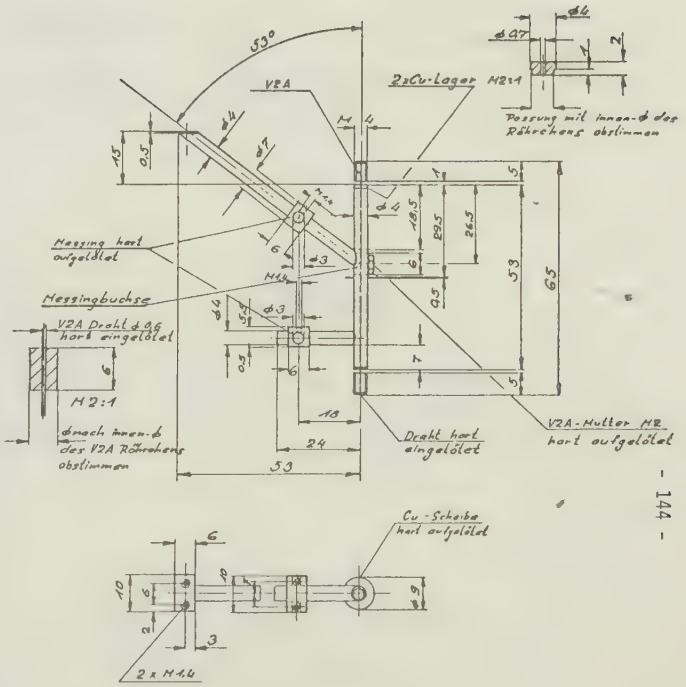


- 143 -

Choppergehäuse
Mat.: Al
M 1:1

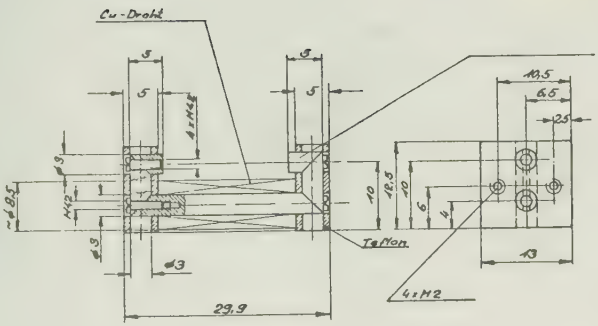
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: CHOPPERGEHÄUSE	MATERIAL: Al	MASSTAB:
		DATUM:	NAME: Hühlisim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-50	BL. 29 / PGS. 46	BEMERKUNG:

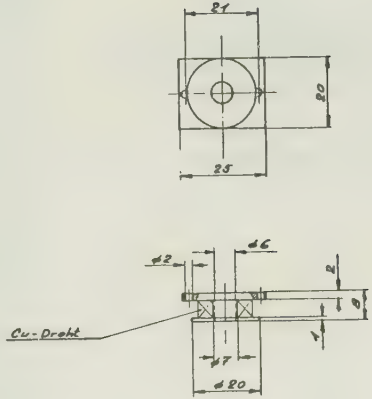




ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: BEFEST.- BUCHSE	MATERIAL: V2A	MASSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHTE UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.	BL. 30	BEMERKUNG

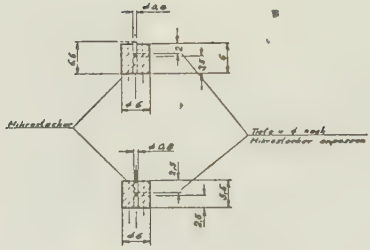
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: CHOPPERGESTÄNGE	MATERIAL: V2A,Cu,Mes	MASSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHTE UND DAMIT DEN	ZEICHN. NR.	BL. 30	BEMERKUNG

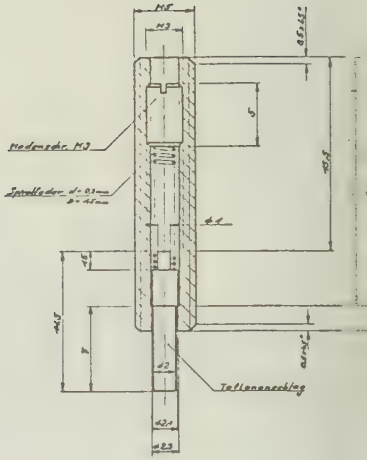




ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: ANTRIEBSSPULE		MATERIAL: Tefl./Cu/Perm.	MASSTAB:
			DATUM:	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-53	BL.: 31 / POS.: 49	BEMERKUNG:	

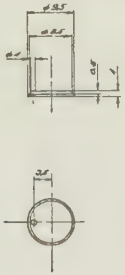
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: REFERENZSPULE		MATERIAL: Teflon/Cu	MASSTAB:
			DATUM:	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-54	BL.: 31 / POS.: 50	BEMERKUNG:	

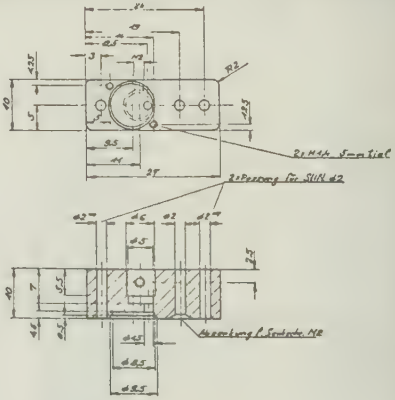




ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: CHOPPERSTECKER	MATERIAL: TEFLON	MASSSTAB:
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHTLICHEN SCHUTZ	ZEICHNUNGS NR.: E1 001 59	BL. 34 / POS. 55	BENENNUNG:

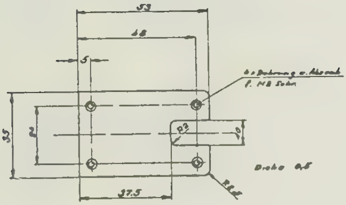
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: CHOPPERANSCHLAG	MATERIAL: Al/VZA/Tefl	MASSSTAB:
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHTLICHEN SCHUTZ	ZEICHNUNGS NR.: E1 001 60	BL. 34 / POS. 56	BENENNUNG:

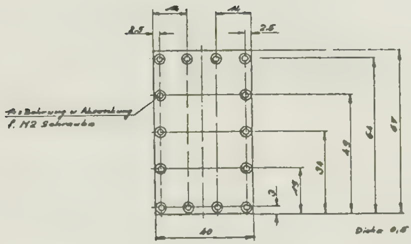




ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: DRUCKPLATTE	MATERIAL: Al	MASSSTAB:
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHTLICHEN SCHUTZ	ZEICHNUNGS NR.: E1-001-61	BL. 35 / POS. 57	BENENNUNG:

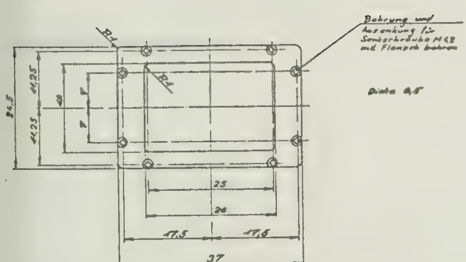
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: STECKERGEHÄUSE	MATERIAL: Al	MASSSTAB:
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHTLICHEN SCHUTZ	ZEICHNUNGS NR.: E1-001-62	BL. 35 / POS. 58	BENENNUNG:

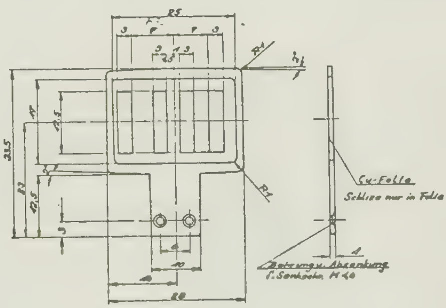




ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: OBERE ABDECKPLATTE	MATERIAL: Al	MASSSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN [redacted]	ZEICHN. NR.: E1-001-55	BL. 32	ÄNDERUNG
		POS. 51	

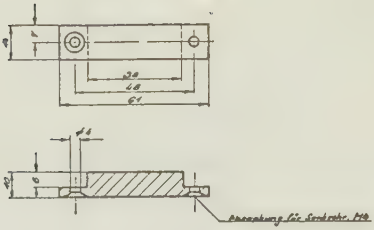
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: ABDECKPLATTE FÜR SPULENRAUM	MATERIAL: Al	MASSSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	E1-001-56	BL. 32	ÄNDERUNG
		POS. 52	

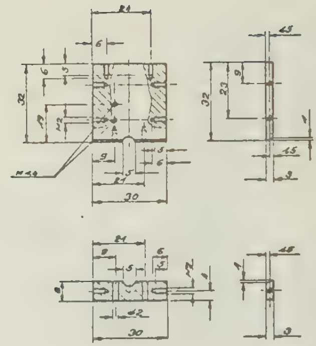




ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: CHOPPERBLAT-ABDECKUNG	MATERIAL: Al	MASSSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-57	BL. 33	ÄNDERUNG
		POS. 53	

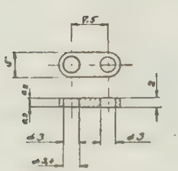
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: CHOPPERBLATT	MATERIAL: Al	MASSSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-58	BL. 33	ÄNDERUNG
		POS. 54	

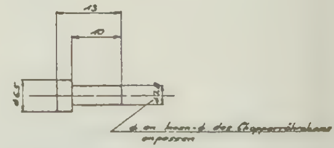




ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG BRÜCKE		MATERIAL Al	MASSTAB
			DATUM	NAME Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR. E1-001-63	BL. 36	BEMERKUNG	
		POS. 59		

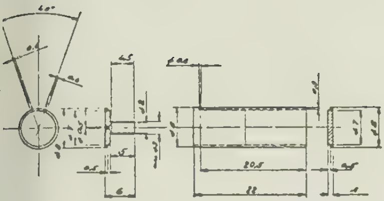
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG ZWISCHENPLATTE		MATERIAL Al	MASSTAB
			DATUM	NAME Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR. E1-001-64	BL. 36	BEMERKUNG	
		POS. 60		

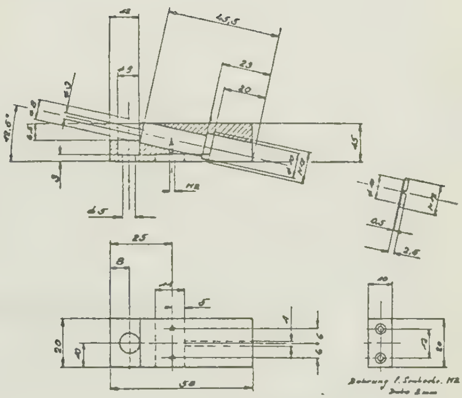




ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG GFK-KETTENGLIED		MATERIAL GFK	MASSTAB
			DATUM	NAME
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR. E1-001-65	BL. 37	BEMERKUNG	
		POS. 62		

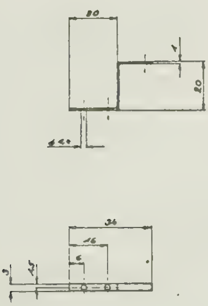
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG AUSGLEICHSGEWICHT		MATERIAL Mess	MASSTAB
			DATUM	NAME
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR. E1-001-66	BL. 37	BEMERKUNG	
		POS. 63		

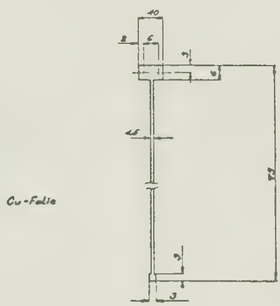




ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: IR-EICHQELLE	MATERIAL: Cu	MASSSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-67	BL. 38	BEMERKUNG
		POS. 64	

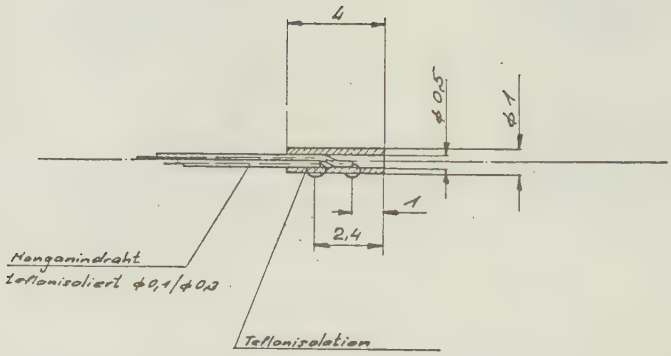
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: HALTERUNG FÜR IR-EICHQELLE	MATERIAL: Cu	MASSSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-68	BL. 38	BEMERKUNG
		POS. 65	



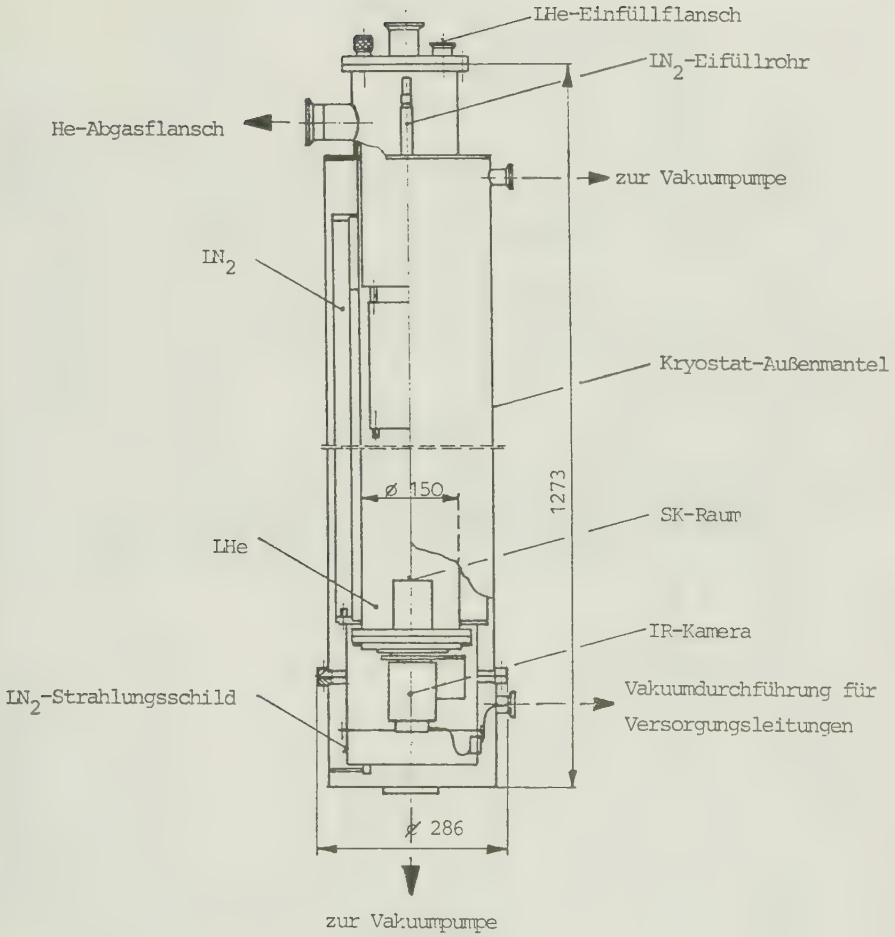


ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: BEFESTIGUNG-T-KÜHLLIZE	MATERIAL: Cu	MASSSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-69	BL. 39	BEMERKUNG
		POS. 66	

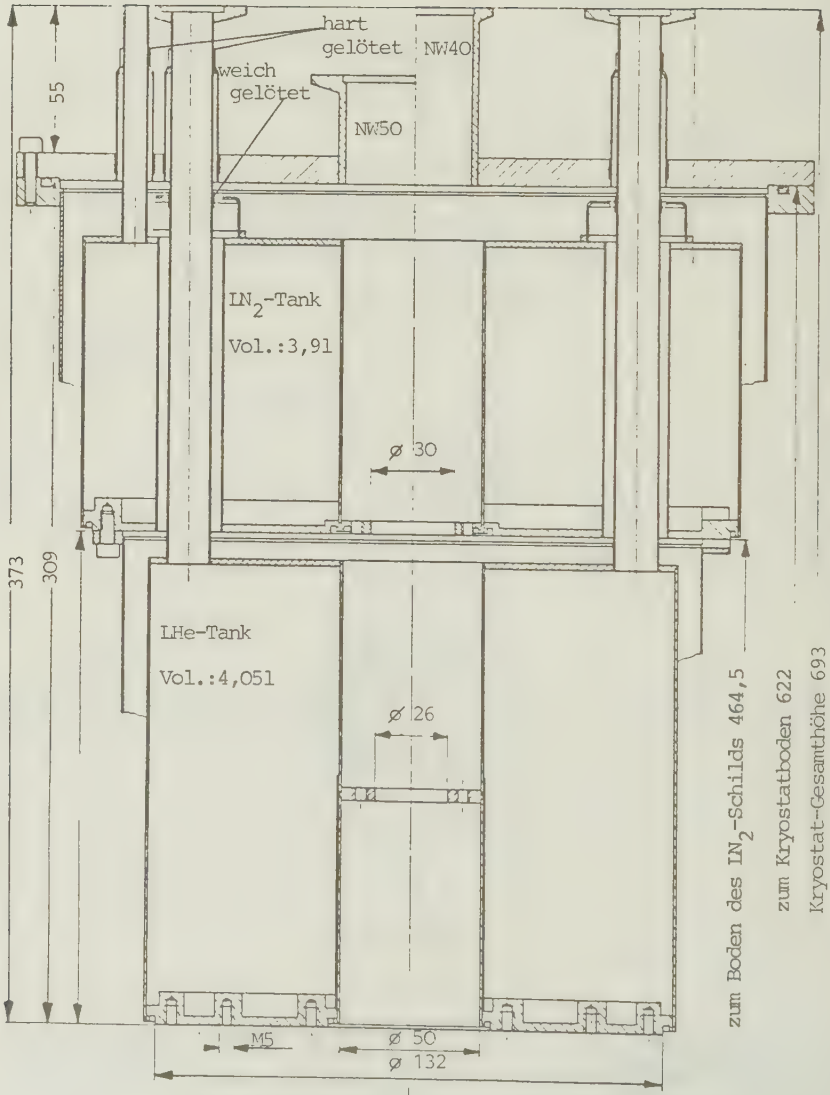
ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: T KÜHLLIZE	MATERIAL: Cu	MASSSTAB
		DATUM	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-70	BL. 39	BEMERKUNG
		POS. 67	



ASTRONOMISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT TÜBINGEN	BEZEICHNUNG: KRALLE	MATERIAL: Teflon/Manganin	MASSTAB:
		DATUM:	NAME: Mühlheim
DIESES DOKUMENT GENIESST URHEBERRECHT UND DAMIT DEN GESETZLICH DAFÜR BESTEHENDEN SCHUTZ	ZEICHN. NR.: E1-001-71	BL.: 40 / POS.: 68	BEMERKUNG:



Zeichnung Nr. Kryostat 1
umgebauter Leybold-Heraeus-Kryostat Bkl 150



Zeichnung Nr. Kryostat 2

Danksagung

Ich danke Herrn Prof.Dr.M.Grewing für die Vergabe und Förderung dieser Arbeit.
Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.Dr.P.R.Preußner für stetige Unterstüzung bei der Durchführung der Arbeit und Anregung zu neuen Ideen.
Auch den Mittgliedern der Infrarot-Gruppe am Astronomischen Institut Tübingen, den Herren R.G.Jaacks, J.Riegger, K.Jörg, D.Frick, sei für die Hilfe bei der Anfertigung der notwendigen Elektronik sowie bei der Experimentdurchführung gedankt.
Für die Herstellung der mechanischen Komponenten danke ich der mechanischen Werkstatt, speziell Herrn A.Weidle, K.Lehman, H.Epple, W.Rexe und besonders F.Nerz für die geduldige und sehr genaue Anfertigung der Miniaturteile, die das Herzstück der Kamera bilden.
Den beiden Sekräterinnen Frau R.Burgdorf und R.Straumann sei für die Hilfe bei der Niederschrift dieser Arbeit gedankt.
Die Arbeit wurde am Astronomischen Institut der Universität Tübingen im Rahmen des Forschungsvorhaben GIRL des Bundesministeriums für Forschung und Technologie durchgeführt, dem für die Bereitstellung von finanziellen Mitteln gedankt sei.

LEBENSLAUF

Geburt	14.6.1948	in Pechgrün/Karlsbad Böhmen als drittes Kind von Karl Mühlheim, Bergmann und Anna Mühlheim geb. Mally
Staatsangehörigkeit		deutsch
Familienstand	seit 1979	verheiratet mit Dr.med. Helena Dusanek-Mühlheim, zwei Töchter
Ausbildung	1954-1963	Grund- und Hauptschule in Chodov Krs. Karlsbad (Böhmen)
	1963-1967	Gewerbe-Mittelschule für Maschinenbau in Ellbogen/Eger
	1967	Abitur
	1967-1968	Tätigkeit als Techniker (Lokführeranwärter) im Lokomotiv-Depot der Tschechoslowakischen Staatsbahn in Falkenau/Eger
	12.9.1968	Aussiedlung in die Bundesrepublik Deutschland
	1968-1969	Besuch eines Sprachkurses am Goethe-Institut in Prien am Chiemsee
	1969-1970	Abituranerkennungslehrgang für spätausgesiedelte Abiturienten am Aufbaugymnasium in Laasphe

Studium	WS 1971/72	Studium der Luft- und Raumfahrttechnik an der TU Stuttgart
	SS 1972	Studiumfachwechsel zum Fach Physik/Diplom an die Universität Tübingen
	1977-1978	Diplomarbeit unter Prof. Dr. R. Hübener über das Thema: Entwicklung und Bau eines Farbstoff-lasers für spektroskopische Untersuchungen
	Feb. 1978	Diplom-Hauptprüfung im Studienfach Physik
	seit 4/1978	wissenschaftlicher Angestellter am Astronomischen Institut der Universität Tübingen im Rahmen des Infrarot-Weltraum-Teleskops GIRL
	1985	Dissertation im Rahmen des GIRL-Projekts am Astronomischen Institut Tübingen unter Prof. Dr. M. Grewing über das Thema: Entwurf und Bau einer Infrarotkamera für den Wellenlängenbereich 3 bis 120µm

Meine akademischen Lehrer waren vor allem die Herren Professoren und Dozenten:

Prof.Dr.M.Baumann, Prof.Dr.G.Breitling, Dr.G.Dähn, Prof.Dr.G.Elwe
Prof.Dr.K.H.Gaukler, Prof.Dr.F.Gönnenwein, Prof.Dr.M.Grewing,
Priv.Doz.Dr.D.Höhn, Prof.Dr.R.Hübener, Prof.Dr.C.Jöhnsson,
Prof.Dr.P.Kramer, Prof.Dr.H.Krüger, Prof.Dr.E.Lindner,
Prof.Dr.G.Mack, Prof.Dr.H.Mauder, Prof.Dr.G.Möllenstedt,
Prof.Dr.R.Mühleisen, Priv.Doz.A.Rieckers, Prof.Dr.R.Schief,
Prof.Dr.E.Schmidt, Prof.Dr. Seiler, Prof.Dr.H.Sohr,
Prof.Dr.H.Stumpf, Prof.Dr.J.Trümper